

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»

На правах рукописи



Сафонова Мария Сергеевна

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И
ДИНАМИКИ НИЗКОГОРНЫХ СУБСРЕДИЗЕМНОМОРСКИХ ЛЕСНЫХ
ЛАНДШАФТОВ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА
(НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОГО КРЫМА)

Специальность 1.6.21. Геоэкология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
Горбунов Роман Вячеславович,
доктор географических наук

Севастополь – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ОСНОВАХ ФОРМИРОВАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СУБСРЕДИЗЕМНОМОРСКИХ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ	15
1.1 Обзор отечественных и зарубежных исследований в области формирования, функционирования и динамики субсредиземноморских лесных горных ландшафтов	15
1.2. Факторы формирования и условия функционирования низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма	39
1.2.1. Географическое положение	39
1.2.2. Геологическое строение и рельеф	41
1.2.3. Климат.....	46
1.2.4. Водные объекты	49
1.2.5. Почвы	51
1.2.6. Растительный мир	52
1.3. Промежуточные выводы по разделу	55
РАЗДЕЛ 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	58
2.1. Стационарные исследовательские площадки в различных типах лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма	58
2.1.1. Исследовательская площадка на восточном склоне хребта Беш-Таш	59
2.1.2. Исследовательская площадка на южном склоне хребта Карагач....	63
2.1.3. Приборная база и ее установка.....	64
2.2. Подход к изучению низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов с использованием беспилотных летательных аппаратов	68
2.3. Методика расчета водного, радиационного и теплового балансов	73
2.3.1. Методика изучения радиационного баланса	73
2.3.2. Методика изучения теплового баланса	77
2.3.3. Методика изучения водного баланса	81
2.4. Методика оценки факторной энтропии ландшафтов	83
2.5. Методика изучения ландшафтных стратегий в условиях климатических изменений	86

2.5.1. Данные	87
2.5.2. Методика исследования	90
2.6. Построение вегетационных моделей по сценариям изменения климата	94
2.6.1. Сценарии изменения климата	94
2.6.2. Построение вегетационной модели	97
2.7. Промежуточные выводы по разделу	101
РАЗДЕЛ 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИАЦИОННОГО, ТЕПЛОВОГО И ВОДНОГО БАЛАНСОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НИЗКОГОРНЫХ СУБСРЕДИЗЕМНОМОРСКИХ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ	
	103
3.1. Результаты расчета радиационного баланса	103
3.1.1. Радиационный баланс в пределах открытого участка	103
3.1.2. Радиационный баланс пушистодубового леса	105
3.1.3. Радиационный баланс можжевельного леса	116
3.1.4. Сравнительный анализ радиационного баланса пушистодубового и можжевельного лесов	125
3.2. Результаты расчета теплового баланса	127
3.2.1. Тепловой баланс открытого участка в зоне пушистодубового леса	127
3.2.2. Тепловой баланс пушистодубового леса	131
3.2.3. Тепловой баланс открытого участка в пределах можжевельного леса	142
3.2.4. Тепловой баланс можжевельного леса	147
3.2.5. Сравнительный анализ теплового баланса пушистодубового и можжевельного лесов	157
3.3. Результаты расчета водного баланса	159
3.4. Промежуточные выводы по разделу	175
РАЗДЕЛ 4 ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЮГО-ВОСТОЧНОГО КРЫМА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА	
	177
4.1. Факторная энтропия низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов	177

4.2. Динамика значений NDVI в Юго-Восточном Крыму	181
4.3. Тренд NDVI	187
4.4. Коэффициент вариации.....	190
4.5. Индекс Херста	191
4.6. Влияние климатических факторов на изменение NDVI в Юго- Восточном Крыму	193
4.7. Некоторые теоретические аспекты исследования ландшафтных стратегий.....	194
4.8. Прогноз динамики структуры растительного сообщества	201
4.8.1 Пушистодубовый лес	202
4.8.2 Можжевельниковый лес	212
4.9. Промежуточные выводы по разделу	222
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	224
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	228

ВЕДЕНИЕ

Обоснование выбора темы и её актуальности. Функционирование ландшафтов определяется вещественно-энергетическим обменом между экосистемой и окружающей ее средой. Несмотря на достаточно продолжительную историю изучения этого вопроса в ландшафтоведении и геоэкологии, процесс вещественно-энергетического обмена в пределах ландшафта на региональном и локальном уровне до конца не изучен. В мире имеются разрозненные как в пространственном, так и во временном масштабах исследования в данной области и, как следствие, недостаточные и неравномерные данные, что объясняется сложностью проведения таких работ.

А.Г. Исаченко (1991) отмечает, что для количественной оценки функционирования и выявления соотношения между внешним и внутренним вещественно-энергетическим обменом необходимы данные по балансам различных видов вещества и энергии, т.е. нужно знать величины их поступления в систему, внутреннего обмена, трансформации и аккумуляции в системе, потерь за счет выноса во внешнюю среду.

Изменение климата приводит к изменению структуры радиационного, теплового, водного и вещественного балансов геоэкосистем, трансформируя, таким образом, потоки вещества и энергии. Причем эти изменения формируют цепь событий, при развитии которой функциональные изменения приводят к структурным трансформациям в ландшафте. Структура лесов Крымского полуострова описана в литературе, однако исследованию функционирования лесных геоэкосистем в Крыму уделено очень мало внимания, особенно на топологическом уровне.

Данная работа направлена на изучение процессов функционирования лесных ландшафтов в условиях субсредиземноморского низкогорья Юго-Восточного Крыма. Выбранная территория перспективна для изучения подобного типа ландшафтов, так как в ее пределах лесные сообщества

формируются на границе своего ареала, по своей сути, являясь геоэктоном регионального масштаба, в достаточно экстремальных условиях среды, что определяет их высокую уязвимость к климатическим изменениям.

Таким образом, актуальность исследования вытекает из необходимости и целесообразности сохранения природных ландшафтов, адаптации системы природопользования в условиях региональных проявлений изменения климата с целью достижения показателей устойчивого развития.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время активно исследуется изменение климата и последствия, которые оказывают эти изменения на функционирование лесных ландшафтов [Marino et al., 2005; Peñuelas et al., 2017; Nunes et al., 2021; Suárez-Muñoz et al., 2023; J. Peñuelas et al., 2017; L.J.R. Nunes et al., 2021; J.C. Pérez-Girón et al., 2020; D. Sousa и W. Davis Frank, 2020; Paoletti, 2005; A. Costa et al., 2011].

Изучению лесов Крымского полуострова посвящен цикл работ Ю.В. Плугатаря [Плугатарь, 2015; Плугатарь, Корженевский, 2016; Плугатарь и др., 2019, 2022], В.В. Корженевского [Корженевский, 1981, 1982; Корженевский, Шеляг-Сосонко, 1983; Корженевский, Клюкин, 1989; Корженевский, Багрикова, 1997], Л.П. Мироновой [Миронова, 2017, 2019, 2020], Н.Б. Ермакова с соавторами [Ermakov et al., 2021], В.А. Бокова с соавторами [Ландшафтно-экологический стационар..., 1999; Ландшафтно-геофизические условия..., 2001; Трансформация ландшафтно-экологических процессов..., 2010] и др.

Функционирование лесных экосистем главным образом определяется радиационным, тепловым и водными балансами рассматриваемых ландшафтов [Арманд, 1975; Сочава, 1978; Солнцев, 1981; Беручашвили, 1986; Беручашвили, 1990; Мамай, 1992]. В Горном Крыму стоит отметить исследования, проводимые под руководством И.П. Ведя [Ведь, 1971, 1974, 1978; Ведь, Федосеев, 1967]. Теоретические основы изучения теплового и радиационного баланса земной поверхности заложены в работах А.И. Воейкова (1884), М.И. Будыко (1956), Т.Г. Берлянда (1948).

Примером расчета элементов теплового баланса лесов и их описания в Крыму на региональном и локальном уровнях являются работы И.П. Ведя [Ведь, 1971, 1974, 1978; Ведь, Федосеев, 1967], В.А. Бокова [Ландшафтно-геофизические условия..., 2001]. Однако комплексному подходу в изучении поступления солнечной радиации, радиационного баланса и его распределения на локальном уровне, в отдельных типах растительных сообществ, уделено недостаточно внимания.

Также в работах зарубежных авторов отмечается сосредоточенность на одном определенном элементе баланса с его особенностями, или природном явлении, оказывающим влияние на изменение изучаемого параметра [Brunt, 1932; Christen et al., 2008; Fuchs et al., 2021; Wang et al., 2021; Bhattacharya et al., 2022; Vecellio et al., 2022; Njuki et al., 2023; Ander, 2021; Partington, 1949; Prigogine, Defay, 1954; Adkins, 1975; Landsberg, 1978; Perrot, 1998; Clark, 2004].

Тема изменения климата и глобального потепления широко обсуждается научным сообществом. В России влияние изменение климата рассматривают с точки зрения развития растительности: распространение, болезни, фенологического отклика, адаптации и стрессоустойчивость [Акатов П.В., 2009; Игнатов А.Н., 2020; Санданов Д.В., 2020; Некляев С.Э., 2022; Фомин Э.С., 2023; Эчедеи Й.Й., 2005]. Зарубежные ученые пошли по другому пути, где на основе прогноза изменения климата моделируется состояние растительного сообщества [Leng W., 2007; Moriondo M., 2008].

Исследования в области формирования и функционирования лесных горных ландшафтов представляют собой активно развивающуюся область науки. Однако большинство отечественных исследований в этой области склонны фокусироваться на региональном уровне, уделяя меньше внимания топологическим аспектам.

Цель исследования – изучить геоэкологические аспекты функционирования и динамики лесных ландшафтов субсредиземноморского низкогорья Юго-Восточного Крыма в условиях изменения климата.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Выполнить анализ изученности вопроса функционирования и динамики лесных ландшафтов в условиях изменения климата. Сформулировать теоретико-методологические подходы исследования функционирования и динамики лесных ландшафтов на топологическом уровне.
2. Описать физико-географические факторы формирования и условия функционирования низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма.
3. Выполнить анализ круговоротов вещества и энергии на основе радиационного, теплового и водного балансов различных типов низкогорных субсредиземноморских ландшафтов с учетом влияния особенностей рельефа крон.
4. Определить значения факторной энтропии и индекса Херста на основе вегетационного индекса NDVI, для выявления ландшафтных стратегий различных типов низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов в современных условиях климатических изменений.
5. На основе сценариев изменения климата и представлений о структуре и динамике лесных ландшафтов с использованием динамических моделей растительности спрогнозировать основные показатели состояния и функционирования пушистодубового и можжевельового лесов до конца XXI века.

Объект исследования - лесные ландшафты субсредиземноморского низкогорья Юго-Восточного Крыма.

Предмет исследования – особенности функционирования и динамики лесных ландшафтов субсредиземноморского низкогорья Юго-Восточного Крыма (на примере пушистодубовых и можжевельовых лесов Карадагского заповедника).

Научная новизна заключается в следующем:

1. Сформулирован комплексный подход в изучении процессов функционирования и динамики лесных ландшафтов на топологическом уровне в условиях изменения климата.
2. На основе данных мониторинговых измерений показаны пространственно-временные закономерности влияния кроны деревьев на распределение вещества и энергии в ландшафтах на локальном уровне.
3. На примере пушистодубового и можжевельного лесов выявлено влияние локальных факторов на особенности их функционирования и динамики в условиях изменения климата. Определены их индивидуальные стратегии согласно сценариям изменения климата.
4. На основе рассчитанных ландшафтных стратегий и моделей продемонстрировано влияние изменения климата на структуру и функционирование ландшафтов и сформирована теоретическая база для рационального природопользования.

Теоретическая значимость работы.

В работе систематизирован накопленный отечественными и зарубежными учеными опыт изучения и проведения исследований функционирования лесных ландшафтов. На основании проведенных исследований получены новые представления, результаты и выводы, которые значительно углубляют понимание особенностей функционирования лесных ландшафтов и локальных особенностей, оказывающих на них влияние. Впервые для лесов юго-восточного Крыма была продемонстрирована роль кроны деревьев в распределении потоков вещества и энергии, а также динамика лесных ландшафтов на локальном уровне в условиях изменения климата.

Используемый в работе набор методов позволяет провести комплексное исследование, позволяющее расширить представление о влиянии локальных

особенностей территории на климатические показатели, растительный покров и тенденции их изменения.

Практическая значимость работы.

Используемый комплексный подход может быть эффективно применен для решения как теоретических, так и практических задач, связанных с функционированием и динамикой лесных ландшафтов в условиях изменения климата. Сочетание методик, основанных на открытых данных и доступных средствах геоинформационных систем (ГИС) вместе с натурными измерениями, расширяет возможности анализа реакции локальных ландшафтов на изменения. Это, в свою очередь, может стать основой для разработки адаптивных подходов к природопользованию в условиях изменяющейся окружающей среды.

Проведенные исследования актуализируют данные о климатических нормах, которые могут быть использованы при планировании и управлении различных природно-хозяйственных систем, включая создание новых объектов особо охраняемых природных территорий (ООПТ), адаптацию лесного хозяйства. Результаты работы могут быть применены для организации системы более эффективной охраны природы, в частности реликтовых для Крыма субсредиземноморских ландшафтов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Наличие леса и характеристики его кроны оказывают значительное влияние на распределение вещества и энергии в ландшафте, особенно на тепловой баланс. Степень этого влияния определяется сезонным изменением рельефа крон, чем более развитая крона, тем сильнее ее влияние на распределение потоков тепла и энергии.

2. Сезонные изменения сложности распределения солнечной радиации, индекса NDVI, экспозиции и крутизны кронового рельефа приводят к изменению некоторых микроклиматических параметров, таких как температура воздуха, почвы, количества испарения, что отражается в формировании стратегий развития или стабилизации основных типов

ландшафтов. В лесах юго-восточного Крыма при смене сезонов за счет высоты солнца над горизонтом в летний период происходят процессы стабилизации.

3. На основании значения индекса Херста можно утверждать, что тренд изменения зеленой фитомассы сохранит свою направленность на увеличение, система будет оставаться стабильной, и будут сформированы предпосылки для стратегии развития в пределах рассматриваемых лесных ландшафтов.

4. Спрогнозированное геоэкологическое состояние рассматриваемых ключевых участков на основе сценариев изменения климата демонстрирует большую вероятность распространения средиземноморской растительности на юго-востоке Крыма при сохранении тенденции изменения климата.

Методология и методы исследования. Работа основана на фундаментальных исследованиях в области физической географии, климатологии, геоэкологии, ландшафтной экологии и ландшафтоведения. В работе были использованы следующие методы исследования: литературно-аналитический, полевые методы исследования, картографический, геоинформационный (программный комплекс продуктов ArcGIS, QGIS, Pix4D), аэрокосмические методы (получение космических снимков высокого разрешения из открытых источников (Landsat, Sentinel, MODIS) и их анализ), дистанционные методы (съемка квадрокоптера), математические, а также статистические (программное обеспечение для статистической обработки полученных данных (Microsoft Excel, LPJ-GUESS)). Методологической основой исследования выступают представления о лесных ландшафтах [Алексеев, 1975; Арманд, 1975; Беручашвили, 1986, 1990; Бобра, 2007; Боков, 2020; Гаркуша, 2008; Зукерт, 1967; Боков, 2011] и их функционировании и динамике [Акимова, 1975; Антюфеев, 1988; Барашкова, 1961; Берлянд, 1948; Битюков, 2012; Будыко, 1956; Ведь, 1978; Выгодская, 1967; Горбунов, 2022], а

также применении геоинформационных технологий. В основу работы легли результаты собственных исследований автора за период с 2020 по 2025 гг.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности: Работа соответствует паспорту специальности 1.6.21 «Геоэкология»: п. 5. Природная среда и индикаторы ее изменения под влиянием естественных природных процессов и хозяйственной деятельности человека (химическое и радиоактивное загрязнение биоты, почв, пород, поверхностных и подземных вод), наведенных физических полей, изменения состояния криолитозоны; п. 7. Геоэкологические аспекты устойчивого развития регионов, функционирования природно-технических систем. Оптимизация взаимодействия (коэволюция) природной и техногенной подсистем; п. 11. Оценка экологического состояния и управление современными ландшафтами. Глобальные и региональные изменения ландшафтно-климатических условий среды обитания в антропоцене; п. 14. Научные основы организации геоэкологического мониторинга природно-технических систем и обеспечение их экологической безопасности, разработка средств контроля состояния окружающей среды; п. 16. Моделирование геоэкологических процессов и последствий хозяйственной деятельности для природных комплексов и их отдельных компонентов. Современные методы геоэкологического картирования, ГИС технологии и информационные системы в геоэкологии.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Работа выполнена автором в течении 2020–2025 гг. Основные результаты диссертационной работы нашли отражение при исполнении темы НИР № 121040100327-3 «Изучение пространственно-временной организации водных и сухопутных экосистем с целью развития системы оперативного мониторинга на основе данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий», НИР № 124030100030-0 «Изучение особенностей функционирования и динамики субтропических и тропических прибрежных экосистем в условиях изменения климата и антропогенной нагрузки с

использованием методов дистанционных исследований, технологий облачной обработки информации и машинного обучения для создания научных основ их рационального использования», Гранта РНФ №22-27-00579 «Функционирование низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов (на примере юго-восточного Крыма)» и Гранта Минобрнауки России в форме субсидий на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» № 075-15-2024-644. Апробация материалов исследования проведена на Всероссийской научной конференции, посвященной 30-летию Карадагского ландшафтно-экологическому Стационару «Экспериментальное ландшафтоведение: теория, методология, практика» (г. Феодосия, пгт Курортное; Севастополь: ФИЦ ИнБЮМ, 25–29 сентября 2023 г.), Международной научно-практической конференции «Природно-ресурсный потенциал и экологическая реабилитация деградированных ландшафтов» (Грозный, 17–18 марта 2023 г.), VI Кавказском Международном экологическом форуме «Комплексное изучение экосистем горных территорий» (Грозный, 20–21 октября 2023 г.), Международной научно-практической конференции «Пятые ландшафтно-экологические чтения, посвященные Г. Е. Гришанкову» Природа и общество: интеграционные процессы (Севастополь, 12–16 сентября 2022), III Международной научно-практической конференции «Изучение водных и наземных экосистем: история и современность» (Севастополь, 2–7 сентября 2024 г.), II Международной научно-практической конференции «Изучение водных и наземных экосистем: история и современность» (Севастополь, 5–9 сентября 2022 г.).

Публикации. По теме работы опубликовано 18 работ, в том числе: 3 работы в изданиях МБД SCOPUS и Web of Science, 7 статей в журналах из перечня ВАК, 2 главы в монографиях, 1 монография.

Объем и структура работы. Общий объем основной части работы составляет 279 страницы машинописного текста. Работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, состоящего из 416 источников. Работа включает 108 рисунков и 18 таблиц.

Автор **выражает искреннюю благодарность** сотрудникам лаборатории ландшафтной экологии и геоматики ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» и научному руководителю д.г.н. Горбунову Р.В. за поддержку и помощь в написании работы.

РАЗДЕЛ 1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ОСНОВАХ ФОРМИРОВАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СУБСРЕДИЗЕМНОМОРСКИХ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ

1.1 Обзор отечественных и зарубежных исследований в области формирования, функционирования и динамики субсредиземноморских лесных горных ландшафтов

На территории Большого Средиземноморья, заселенном и антропогенно преобразованном в течении многих тысячелетий, существуют и изучаются как природные нетронутые ландшафты, так и трансформированные. Приведем обзор наиболее актуальных направлений исследований на территории распространения субсредиземноморского и средиземноморского климата.

Горные и холмистые районы средиземноморья активно используются в сельском хозяйстве, претерпевая трансформации в виде террасирования склонов. В результате террасирования изменялся геоморфологический облик склона, растительный покров, гидрологические условия существования. В последние десятилетия существует тенденция перехода к новой системе сельского хозяйства, характеризующаяся более современными технологиями. В результате прежние сельскохозяйственные районы утратили свое значение и были заброшены, произошла деградация земель. Начались такие неблагоприятные явления и процессы как оползни, обвалы, интенсификация эрозионных процессов [268, 260, 338, 358].

Основная нагрузка переместилась из традиционной горной террасированной области в равнинную часть территории. Как следствие в горных районах наблюдаются процессы зарастания и восстановления лесного покрова.

Большое количество публикаций посвящено выявлению факторов, влияющих на вторичную сукцессию кустарников и лесов на заброшенных сельскохозяйственных полях [268, 239].

F. Geri et al. (2010) изучали динамику ландшафтов в пределах средиземноморского бассейна. Было проанализировано изменение землепользования с 1954 по 2000 гг. посредством сравнения и анализа исторических и современных карт землепользования, составленных на основе аэрофотосъёмки. В результате выявлено, что категория земель «леса» в 95 % площади осталась неизменной, в то время как 13 % «сельскохозяйственных земель» были преобразованы в леса и около 4 % – в «полуприродные территории», которые, в свою очередь, сохранились в первоначальном виде только на 9 %. 35 % территории «полуприродных земель» за полвека стали использоваться как «сельскохозяйственные угодья», а 55 % трансформировались в «леса». Результаты, достигнутые в этой статье, показали общую гомогенизацию изучаемого средиземноморского ландшафта с соответствующим процессом лесоразведения в ущерб полуприродным и сельскохозяйственным районам. Полученные закономерности изменений подтверждают выводы многих исследований, посвященных центральным и западным районам средиземноморского бассейна. Однако исследования, посвященные южным и восточным районам средиземноморского бассейна, выявили различные движущие силы изменений в землепользовании, в основном из-за разного социально-экономического положения [260].

Как результат исследования Geri et al. [260] выделяют основные тенденции в динамике ландшафтов провинции Сиена (Тоскана, Италия), среди которых расширение лесных площадей в горных и холмистых районах из-за отказа от сельскохозяйственных угодий. Важно отметить, что при естественных сукцессиях наблюдается снижение биоразнообразия, гомогенизация ландшафтной мозаики и распространение монодоминантных сообществ как в лесной части, так и на равнинах.

Кроме того, активно изучаются факторы, влияющие на вторичную сукцессию – природные (температуры воздуха, осадки, их изменение в исследуемый период, уклон поверхности, экспозиция и пр.) и антропогенные (тип полей, время заброшенности поля) [358]. Исследования этих авторов

показали, что высота рельефа и климат являются ведущими в развитии и скорости вторичной сукцессии в горном районе Испании.

При анализе последствий трансформации землепользования и изучении зарастания лесными сообществами заброшенных сельскохозяйственных земель R. Delgado-Arté et al. [239] говорят о внешней и внутренней эволюции лесов. Под внешней эволюцией подразумевается переход от лесных ландшафтов к нелесным и наоборот, под внутренней – изменения внутри типа леса. Отмечается, что при внешней эволюции основным триггером может стать антропогенная деятельность, хотя природный фактор также играет важную роль. При внутренней же эволюции изменения природных условий являются ключевым фактором. Кроме этого, авторы выделяют прогрессивную, регрессивную и неустойчиво сбалансированную динамику ландшафтов. В работе [223] показана динамика изменения лесов в Каталонии при сокращении использования сельскохозяйственных земель. Изучение динамики ландшафтов, изменения землепользования и развитие сукцессии проводятся в основном методами дистанционного зондирования – аэрофотосъемкой на низких высотах или с использованием космических снимков [223, 233, 356, 370, 382, 384, 391].

A. Costa et al. [233] исследуют вопросы динамики ландшафтов дубовых лесов Юго-Западного Средиземноморья на примере ключевых участков в Португалии для выявления ключевых причин их деградации и фрагментации. Были использованы аэрофотоснимки, инструменты ГИС, различные показатели растительного покрова для количественной оценки и мониторинга изменения ландшафтной мозаики и скорости перехода между типами наземного покрова. Анализ проводился за 50-летний период. Результат исследования представлен в виде процентных соотношений изменения площади типа наземного покрова и сравнение по областям исследования. Также приведена социально-экономическая, демографическая оценка регионов. Ландшафты стали более фрагментированы, размеры контуров уменьшились. Три области исследования показали сходную тенденцию

чистых потерь в вечнозеленых дубовых лесах, но совершенно разные процессы изменения ландшафта, то есть разные темпы изменения ландшафта, переходные процессы, фрагментация и модели вкрапления.

Для выявления динамики и функционирования лесных сукцессий в частности и лесных ландшафтов в целом проводятся исследования влажности почвенного покрова, температуры воздуха, осадков, поступления солнечной радиации неблагоприятных природных явлений, в том числе засух (Paoletti, 2005).

D. Sousa и W. Davis Frank [391] разработали методику мониторинга и анализа состояния дубовых ландшафтов в условиях средиземноморского климата средствами дистанционного зондирования. В исследовании используются как космические снимки, так и материалы аэрофотосъемки. Авторы с помощью смешанных временных моделей TMMs проводят мониторинг состояния дубовых лесных ландшафтов на территории Сьерра-Невада.

Актуальными и востребованными направлениями исследования в Средиземноморском регионе являются моделирование трансформаций средиземноморского ландшафта [335], выявления причин и следствий этих преобразований с помощью современных технологий, в том числе, искусственного интеллекта [355].

Исследуется влияние землепользования и его трансформации на биоразнообразие территории, а также изменения, произошедшие в почвенном и растительном покрове [388]. В результате проведенных исследований выявлено, что около 80 % анализируемых земель было подвержено изменению в использовании за 60-летний период. Изменения в землепользовании привели к переходу от ландшафтной мозаики с преобладанием открытых типов растительного покрова к ландшафтной мозаике с преобладанием лесистых типов растительного покрова. Аналогичные тенденции были зафиксированы в Испании [318, 378], на Корсике [231] и в других местах северо-западного Средиземноморья [380].

Проводятся исследования по выявлению роли подлеска и травянистого яруса в функционировании монодоминантных зрелых субсредиземноморских лесов. G. Zhou et al. [415] говорят о том, что биоразнообразие нижних ярусов и подлеска может поддерживать выполнение зрелыми лесами экосистемных услуг.

Большое количество исследований в средиземноморском регионе посвящено функционированию лесных почв. Биогенные летучие органические соединения повсеместно присутствуют в почвах и играют значительную роль в их функционировании. Они обеспечивают широкий спектр биологических взаимодействий между атмосферой, почвой, растительностью и почвенной микробиотой. В результате исследований [342] было показано, что состав и концентрация почвенных летучих органических соединений варьируется в зависимости от доминирующего вида в средиземноморских редколесьях и дубовых лесах. Их состав и концентрация также зависят от температуры и влажности почвы и активности почвенной микробиоты.

A. Forner et al. [252] исследуют влияние фрагментации на способность дубовых лесов противостоять негативным воздействиям засухи. Выявлено, что фрагментация лесов поддерживает функционирование дубов и смягчает водный стресс, испытываемый ими во время засухи. Особенно актуально данное исследование в условиях продолжающегося изменения климата. Отмечено, что в более сухих условиях в небольших участках леса ослабление воздействия засухи на функционирование деревьев было сильнее, тем самым авторы утверждают, что влияние фрагментации на функционирование деревьев возрастает во время сильной засухи.

Проводятся исследования по выявлению связи между дефолиацией и разнообразием в различных древостоях [276]. Известно, что разнообразие деревьев расширяет экосистемные функции леса и повышает устойчивость леса. G. Iacopetti et al. [276] выявили, что в Италии наблюдается общая тенденция к увеличению дефолиации в древостоях с высоким разнообразием.

Изучается функционирование различных видов средиземноморской растительности в условиях изменения климата и показана их устойчивость. Так, J.C. Pérez-Girón et al. [360] выявили, что осадки не являются ограничивающим фактором для ландшафтов атлантического каштанового леса, а лимитирующим фактором первичной продукции каштана является среднегодовая температура.

Представляют интерес результаты D. Liu et al. [316] по изучению влияния длительной засухи в средиземноморском дубовом лесу. Авторы [316] выявили, что длительная засуха (17 лет) с природными экстремальными явлениями усиливает изменение растительности, что может привести к потенциальным экологическим последствиям для функций и услуг средиземноморского ландшафта в будущем.

R.S. de Dios et al. [238] провели классификацию и картографирование смешанных лесов испанского Средиземноморья. В работе [238] авторы показали, что 21 % от общей площади средиземноморских лесов в Европе приходится на Испанию. Также, в [238] отмечается, что смешанные леса в Средиземноморье составляют значительную долю от общей площади лесов. Описанию лесов, функционирующих в схожих условиях внешней среды (средиземноморский климат и его производные) в различных регионах мира посвящены работы [207, 210, 411]. J.S. Beard et al. [210] изучали леса в северо-западной Австралии; M. Barbour et al. [207] – в Калифорнии; K. Wilcox [411] – в Чили.

T. Jakovljević et al. [289] подчеркивают уникальность и хрупкость ландшафтов Средиземноморья и проводят исследования по оценке воздействия загрязнения воздуха на состояние лесных ландшафтов на примере Восточного побережья Адриатики. T. Jakovljević et al. [289] на примере средиземноморских лесов, состоящих главным образом из *Quercus pubescens*, *Quercus ilex*, *Pinus halepensis* и *Pinus nigra*, провели отбор проб, измерения и анализ атмосферных осадений, питательных веществ для листьев, дефолиации и роста растений путем сбора вод с осадкомеров. H. García-Gómez

et al. [258] проводят исследование поступления азота из атмосферы в лесных ландшафты Средиземноморья, как одни из наиболее ценных мест обитания. L. Aguiillaume et al. [202] исследовали сухое осаждение и поглощение азота пологом в четырех средиземноморских лесах из каменного дуба (*Quercus ilex*) на Пиренейском полуострове. Исследование L. Aguiillaume et al. [202] показало, что взаимодействие сухого осаждения, выщелачивания и поглощения в пологе леса было различным в зависимости от климата исследуемого участка и характеристик качества атмосферного воздуха.

Средиземноморские лесные ландшафты подвержены высокой пожароопасности [209, 224, 262], в следствие чего значительно сокращается ландшафтное и биологическое разнообразие [216], а также уменьшается площадь этих уникальных ландшафтов. В работе [368] подчеркивается, что средиземноморские леса очень ценны для биоразнообразия Европы, поскольку в этих лесах количество древесных видов почти в два раза больше, чем в лесах Центральной и Северной Европы. A.C. Gonçalves and A.M. Sousa [262] анализируют лесные пожары в Португалии и Средиземноморье, указывается, что в период 1980–2015 гг. наибольшее среднее количество пожаров наблюдается в Португалии и Испании, а по среднему размеру площади возгораний на один пожар лидируют Хорватия и Греция. M. Vaudena et al. [209] указывают, что повышенная засушливость не способствует восстановлению лесов Средиземноморья после пожара и повторные пожары могут привести к замещению лесов Средиземноморья в кустарниковые формации, где растет легковоспламеняющаяся растительность, которая быстро восстанавливается после пожара. R.S. de Dios et al. [238] описывают проблему, связанную с тем, что смешанные леса практически не представлены в классификациях растительности и картах растительности стран Средиземноморского бассейна, хотя они составляют важную часть из Средиземноморской лесной зоны. Говоря об этом, авторы указывают на тот факт, что многие исследователи рассматривают смешанные леса только как промежуточные или сукцессионные стадии развития лесов состоящих из

одной доминирующей породы деревьев. М. Baudena et al. [209] подчеркивают, что учет пожаров является основополагающим при моделировании растительности средиземноморского типа в сценариях изменения климата. Также пожары влияют на функционирование лесных ландшафтов на локальном уровне. В. Chergui et al. [224] провели исследования на африканском краю бассейна Западного Средиземноморья (частично горы Эр-Риф, север Марокко), леса из пробкового дуба и соснового леса, которые являются наиболее часто выгорающими лесными массивами в этом регионе, и показали локальные особенности лесов, которые влияют на подверженность пожарам и устойчивость к последствиям пожаров. Исследования выполненные К.Х. Soulis et al. [390] показывают, что крупный лесной пожар в Аттике (Греция), который затронул водораздел ручья Ликорема, предоставил возможность для углубленного изучения влияния лесных пожаров на гидрологический баланс естественных водоразделов Средиземноморья. В. Вассиу et al. [204] подчеркивают негативное влияние пожаров на экономическое развитие Средиземноморского региона в целом и локальных местообитаний лесных ландшафтов.

Активно исследуется изменение климата в Средиземноморье и последствия, которые оказывают эти изменения на функционирование лесных ландшафтов [324, 346, 359, 393]. J. Peñuelas et al. [359] подчеркивают, что усиление засушливости, главным образом из-за уменьшения количества осадков, и из-за повышения температур, вероятно, является главной угрозой разнообразию и выживанию средиземноморских лесов. L.J.R. Nunes et al. [346] указывает также на тот факт, что изменение климата в средиземноморских лесных ландшафтах способствует появлению вредителей и распространению инвазивных видов, что непосредственно оказывает влияние на состояние леса. М. Suárez-Muñoz et al. [393] указывают, что климатические изменения в дальнейшем неблагоприятно скажутся на функционировании сосновых лесов, и постепенно будет происходить замещение и переход от чисто сосновых к дубовым и хвойно-дубовым смешанным лесным массивам. С. Marino et al.

[324] показали, как изменение климата влияет на изменение углеродного цикла в лесах южной Италии. R. Ogaya and J. Peñuelas [349] в ходе натурных экспериментов создания искусственной засухи показали, что в средиземноморских дубовых лесах небольшое долгосрочное снижение доступности воды оказало сильное воздействие на рост стволов деревьев, смертность и видовой состав, что привело к изменениям в функционировании, связанное с изменениями в росте, составе и распределении видов, о чем свидетельствует непрерывная замена основных пород деревьев субдоминантными, которые лучше приспособлены к жарким и сухим условиям внешней среды. N. Hidalgo-Triana et al. [270] показывают высокую уязвимость лесов западного Средиземноморья, расположенных на юге Испании, от климатических изменений и говорят о том, что последствия изменения климата станут ощутимы к середине XXI столетия, когда большинство типов лесов будут испытывать климатический стресс.

Большое количество работ посвящено экосистемным услугам, которые оказывают средиземноморские лесные ландшафты [216, 351, 336, 337]. J. Blondel [215] подробно рассматривает более чем двухтысячелетнюю историю освоения Средиземноморья и влияние (как положительное, так и отрицательное) которое оказало это освоение на ландшафты и биоту Средиземноморья. В работе [215] показано, что взаимодействие между компонентами ландшафта и человеческим обществом на различных отрезках исторического развития в Средиземноморье сформировалось в результате сложной «коэволюции». D.E. Orenstein [351] описывает различные экосистемные услуги, которые оказывают сосновыми и смешанными лесами по всему Средиземноморскому бассейну и показывает на примере сосновых лесов Израиля оценку культурных экосистемных услуг.

A. Morán-Ordóñez et al. [336] указывают, что обеспечение экосистемных услуг средиземноморскими лесами будет поставлено под угрозу при повышении температуры воздуха более чем на 2 °C. Это исследование [336] подводит нас к мысли, что изменение климата приведет к общему сокращению

предоставления регулирующих экосистемных услуг (например, накопление углерода, регулирование количества и качества пресной воды) и общему увеличению числа пожаров, выгоревших площадей и, в целом, к увеличению связанных с климатом опасностей для лесов к 2100 году. Также А. Morán-Ordóñez et al. [337] указывают, что прогнозируется значительное сокращение ареала и пригодности среды обитания для наиболее чувствительных к засухе лесных видов, в то время как условия среды обитания станут доступными для более устойчивых к засухе ксерофитных видов и их количество останется стабильным или даже увеличится.

Функционирование и динамика лесных средиземноморских ландшафтов в последние годы активно исследуется с использованием дистанционных методов исследования и географических информационных систем (ГИС), а также с использованием беспилотных летательных аппаратов. Большое число исследований с использованием ГИС посвящено оценке и моделированию изменений лесных ландшафтов Средиземноморья в результате пожаров [213, 225, 397]. R. Ogaya et al. [348] оценивают роста биомассы деревьев и отмирания средиземноморских дубовых лесов с использованием спутниковых данных. ГИС активно применяется для расчетов различных индексов, показывающих степень деградации лесных ландшафтов [334].

Большое количество исследований по изучению субсредиземноморских лесных горных ландшафтов проводятся и отечественными учеными. Исследования направлены на изучение биоразнообразия лесных ландшафтов, условий их произрастания, текущего состояния [64, 77, 18, 154], особенности их функционирования [143, 144]. При этом следует отметить, что бореальные равнинные лесные ландшафты в России имеют более длительный период изучения и по ним имеется большой объем научных работ.

На территории восточного побережья Черного моря проводятся крупномасштабные ландшафтные исследования с целью выявления пространственных закономерностей формирования растительного покрова приморских ландшафтов гемиксерофитных субсредиземноморских лесов и

редколесий полуострова Абрау и средиземноморской флоры в государственном природном заповеднике «Утриш» [28, 78, 144, 192, 217]. А.И. Чернодубов и Я.Г. Руденок [192] рассматривают разнообразие лесообразующих древесных пород и указывают, что хвойные породы являются доминирующими в прибрежной части заповедника, а дубравы базовые фитоценозы, которые формируют облик лесного фонда заповедника Утриш. Проанализированы катенарные закономерности произрастания субсредиземноморской растительности с связи с особенностями увлажнения, влагообеспеченности, крутизной склонов [28, 217].

Горные леса также активно исследуются в восточном Причерноморье на территории Абхазии [13, 164, 165]. Т.Б. Сангулия указывает [164], что в Абхазии буковые леса занимают почти половину от общей площади лесов, а пихтовые и пихто-еловые леса – приблизительно 1/4 часть площади лесов Абхазии. Т.Б. Сангулия и А.И. Сиволапов [165] выявили, что в буковых лесах Абхазии основную массу древостоя составляют деревья второго возрастного поколения (около 60 %). С.М. Бебия [13] исследует особенности распространения, формирования и ценотической динамики лесов из ольхи бородатой (*Alnus barbata* С.А. Мей.), а также показывает экологические функции и роль ольховых лесов в сложении лесного покрова региона. V.P. Koba et al. [304] изучали каштановые леса Абхазии. В целом исследованию растительных сообществ широколиственных лесов Колхидской низменности в Западном Закавказье посвящена работа Н.Б. Ермакова с соавторами [74].

Средиземноморские леса Черноморского побережья активно изучаются в Турции [232, 301, 302, 306, 352]. S. Köse и E.Z. Başkent [306] подчеркивают, что в пределах Восточного Причерноморья в Турции леса сильно деградировали и истощились. В то же время, S. Keleş et al. [302] подчеркивают, что в последние годы состояние лесов в причерноморских регионах Турции улучшилось и ценность лесов изменилась с экономической на экологическую и социокультурную. M. Coşkun и S. Coşkun [232] изучали распространение

маквисовых зарослей в бассейне Карабук-Сафранболу (Западное Причерноморье, северо-запад Турции). В результате исследований они показали, что в бассейне Карабук-Сафранболу, который расположен в пределах 100 км от береговой линии и является районом, где преобладает средиземноморский климат, произрастают европейско-сибирские и средиземноморские виды растений, и данный район по природным условиям схож с Средиземноморским регионом, Калифорнией, Чили, Капской областью и Австралией.

Изучению субсредиземноморских лесов на территории Крымского полуострова посвящен цикл работ Ю.В. Плугатаря [149, 148, 146, 148], В.В. Корженевского [100, 101, 102, 103, 105], Л.П. Мироновой [123, 124, 125], Н.Б. Ермакова с соавторами [244, 245], В.А. Бокова с соавторами [114, 115, 186, 185] и др.

В работе [149] Ю.В. Плугатарь приводит характеристику лесов Крымского полуострова с позиций лесной типологии, происхождения растительности региона, истории их эксплуатации, экологической роли, продуктивности древостоев и оптимизации использования их потенциала в природоохранных и рекреационных целях на основе экологического лесоводства и стратегии устойчивого развития.

Также в Горном Крыму проводятся исследования регионального и локального масштабов по изучению сосновых [146], ольховых [100], буковых [121, 162, 168], грабовых [41] и дубовых лесов [150]. Ю. В. Плугатарь с соавторами [146] изучают особенности территориального распределения, продуктивности и типологической структуры естественных древостоев сосны в Горном Крыму, среди которых преобладают насаждения сосны крымской. Л.Я. Гаркуша [41] показывает возрастную структуру, естественное возобновление и природоохранное значение грабовых лесов Горного Крыма и отмечает, что грабовые леса горного Крыма во многом сходны с грабовыми лесами юго-восточной части Франции, предгорий Альп, северных Апеннин, Балканского полуострова. В.В. Корженевский и Ю.В. Плугатарь [147]

исследуют факторы внешней среды, влияющие на произрастание лесов *Pinus sylvestris* var. *hamata* Steven в Горном Крыму. В.В. Косолапов [107] рассматривает в сравнении характеристику уникальной области полусухих субтропиков Южного берега Крыма и Черноморского побережья Кавказа.

Особенности типологической структуры средиземноморских лесных формаций в Горном Крыму исследовал Н.А. Пшеничников [158]. В лесах Юго-Восточного Крыма проводятся исследования по изучению возрастной структуры ценопопуляций липы опушённостолбиковой (*Tilia dasystyla*) [113], фисташки туполистной (*Pistacia mutica* Fisot. & C.A. Mey) [117].

На территории Горного Крыма и Южного берега Крыма некоторыми исследователями изучались реликтовые субсредиземноморские леса из можжевельника высокого (*Junipereta excelsae*). В частности, В.В. Фатерыга [188] исследовала эколого-биологическую структуру флоры высокоможжевельниковых лесов Южного берега Крыма в условиях рекреационного воздействия. Эколого-биологическая структура этих лесов в целом исследовалась также Ю.Р. Шеляг-Сосонко и Я.П. Дидуком [196], В.Н. Голубевым [51], И.В. Голубевой [52], в том числе и частично на локальном уровне. В.В. Фатерыга [188] проводила изучение эколого-биологической структуры флоры можжевельниковых лесов Южного берега Крыма в 2007–2009 гг. на 8 стационарных площадях, расположенных в пределах ареала можжевельниковых лесов (от заказника Мыс Айя до г. Судака).

Субсредиземноморская и средиземноморская растительность исследуется во многих работах в рамках описания растительного покрова отдельных районов Юго-Восточного Крыма – Карадага [126], полуострова Меганом [129], хребта Тепе-Оба [195], хребта Узунсырт [128], Баракольской котловины [128], Эчкидага [92, 94] и пр., а также Крымского полуострова в целом [71, 72].

Имеются отдельные попытки проведения балансовых исследований в Горном Крыму. Стоит отметить исследования, проводимые под руководством И.П. Ведя [31, 33, 34, 35]. Однако, они выполнялись в довольно ограниченных

локациях, что затрудняет их экстраполяцию и сравнение с современными данными.

В.П. Коба [95] провел оценку динамики водного баланса хвойных лесов Горного Крыма. Исследования были выполнены в мае – октябре 2000 г. на южном макросклоне Главной гряды Крымских гор в районе хребта Иограф в насаждениях сосны крымской в параллельной оценке динамики аналогичных процессов на участках, пройденных огнем, где лес после пожара был полностью вырублен [96].

Т.В. Бобра и А.И. Лычак [24] разработали схему мониторинга экологического состояния лесов восточного южного берега Крыма В.П. Коба [96] и В. Г. Кобечинская и Т. С. Онищенко [97] рассматривали вопросы оценки последствий пожаров на территории Южного берега Крыма. Вопросами мониторинга также занимались Ю.В. Плугатарь и А.Ю. Астапов [145].

Т.В. Бобра [21, 22] провела оценку ландшафтно-экологических условий (типов геотопов), индицирующих, главным образом, по изменению растительных сообществ с различной вертикальной структурой, степенью увлажнения и биомассой на локальном уровне в пределах отдельных участков на территории Карадагского заповедника.

На территории Крымского полуострова проводятся стационарные исследования условий произрастания и функционирования лесных ландшафтов, в частности, субсредиземноморских ландшафтов. В 1993 году заложен Карадагский ландшафтно-экологический стационар, на котором выполняются регулярные измерения температуры воздуха, количества атмосферных осадков, влажности почв, уровня грунтовых вод. Изучается вертикальная структура различных типов лесных ландшафтов, фитометрия, фенология, проводятся комплексные исследования по экологическому состоянию лесов [23, 24, 115, 114], оценивается влияние увлажнения на произрастание лесов [26].

В тоже время нужно понимать, что функционирование лесных ландшафтов главным образом определяется радиационным, тепловым и

водными балансами рассматриваемых ландшафтов [8, 16, 17, 120, 178]. Важность изучения радиационного баланса и поступления солнечной радиации определяется их ведущей энергетической ролью в исследованиях структуры и функционирования ландшафтов. Именно их перераспределение в ландшафте определяет горизонтальную и вертикальную структуру.

Теоретические основы изучения радиационного баланса территории заложены М.И. Будыко [29] и М.Е. Берляндом [15]. Но представленные ими методики опирались на определенный ряд метеорологических параметров, не затрагивая особенности растительного сообщества на изучаемой территории. Изучению радиационного баланса лесных сообществ уделяли внимание Д.П. Акимова [4], В.А. Алексеева [5], Н.Н. Выгодская [39, 40], Н.В. Зукерт с соавторами [76], Н.А. Битюкова [19], И.С. Угарова [187].

Для территории лесов Крымского полуострова в целом имеются довольно скудные сведения о значениях поступающей радиации и радиационном балансе [106, 305, 399]. Примером расчета радиационного баланса и его описания в Крыму на региональном и локальном уровнях являются работы В.А. Бокова с соавторами [115, 114, 186], Р.В. Горбунова с соавторами [58, 59], В.О. Смирнова [173, 174], В.В. Антюфеева [7]. Однако комплексному подходу в изучении поступления солнечной радиации и радиационного баланса локального уровня, отдельных типов растительных сообществ, уделено недостаточно внимания.

Е.И. Ергина с соавторами [73] указывают, что построена карта радиационного баланса территории Крымского полуострова, однако саму карту не приводят. Л.Я. Гаркуша и Л.А. Багрова [43] указывают что радиационный баланс в пределах дубовых лесов северного макросклона Крымских гор составляет в среднем за год $55,4 \text{ ккал/см}^2$. В.В. Антюфеев [7] приводит расчеты радиационного баланса и картограммы для территории западной и центральной части Горного Крыма, которые, к сожалению, не затрагивают исследуемый нами район. В другой своей работе В.В. Антюфеев [7] приводит соотношение составляющих теплового и водного балансов в

ландшафтных районах Горного Крыма и указывает, что на Карадаге значения радиационного баланса оставляют 2365 МДж/м².

На региональном уровне проводились исследования радиационного баланса в пределах ландшафтов дубовых, буковых и сосновых лесов [58, 59]. В.О. Смирнов [170, 172, 174] исследовал значения радиационного баланса на локальном уровне на территории заповедника Мыс Мартьян. Локальные исследования солнечной радиации так же проводятся в Никитском ботаническом саду [106, 191]. Годовая величина прямой солнечной радиации в данном районе составляет 2613 МДж/м², рассеянной – 1792 МДж/м², суммарной – 4405 МДж/м² [106]. Некоторые данные по радиационному балансу и его составляющим для Крыма приведены в работах Н.И. Гойсы [49, 50], А.А. Борисова [27], Е.П. Барашковой [10], Е.М. Чумаковой [194], С.И. Сивкова [167], К. Я. Кондратьева и Г. В. Розенберга [99] и др.

Важность изучения теплового баланса, его составляющих и их соотношение между собой определяется выявлением закономерностей, определяющих метеорологический и гидрологический режим ландшафтов, и возможностью прогноза и расчета основных процессов и явлений, характеризующих структуру и функционирование. Все важнейшие природные процессы наиболее интенсивно протекают вблизи земной поверхности, таким образом сведения о тепловом балансе поверхности и прилегающих слоев атмосферы имеют большое значение при изучении причинно-следственных связей и закономерностей всего комплекса природных процессов [29].

Преобразование поступающей на земную поверхность солнечной энергии оказывает большое влияние на динамику всех экзогенных природных процессов, следовательно, на основе данных по тепловому балансу возможно проводить исследования многих географических закономерностей.

Обмен теплом между поверхностью и атмосферой происходит посредством потоков длинноволновой радиации, а также потоков явного и скрытого тепла [82].

Теоретические основы изучения теплового баланса земной поверхности заложены в работах А.И. Воейкова [37], М.И. Будыко [29], Т.Г. Берлянда [14]. Было отмечено, что прямых измерений составляющих теплового баланса недостаточно для полноценного климатологического описания, что привело к использованию косвенных методов расчета с помощью основных климатических параметров: температура и влажность воздуха, осадки, ветер, температура подстилающей поверхности и др. Такой подход позволил подстраивать методику под необходимый масштаб исследования с доступными метеорологическими данными. Однако, в большинстве случаев, применяются методы, рассчитанные для значительных периодов, в то время как расчет составляющих теплового баланса за короткие сроки не всегда возможен.

Особенностям теплообмена атмосферы с различным типом подстилающей поверхности уделяет внимание А.В. Павлов [140]. Помимо общей методики выделяются частные направления расчета составляющих теплового баланса для таких поверхностей как водные объекты, почвенный покров, растительный покров и ледники [83, 140, 157].

Вопросами изучения теплового баланса задаются во всем мире [214, 220, 226, 253, 345, 403, 405]. Земной баланс климата рассматривается с точки зрения энергетического баланса [203], а распределение тепла в земной поверхности описывается моделями потока тепла в почве [214]. В процессе исследований используются как методы дистанционного зондирования Земли, так и стационарные градиентные наблюдения [220]. В процессе описания составляющих теплового баланса уделяется внимание разделению потоков на явное и скрытое тепло [345, 406]. Явное тепло – это тепло, передаваемое телом или термодинамической системой, при котором теплообмен изменяет температуру тела или системы, но оставляет неизменными макроскопические переменные тела или системы, такие как объем или давление [201, 308, 357, 365], а скрытое тепло – теплота, высвобождаемая или поглощаемая термодинамической системой при изменении своего состояния, но не

сопровождаясь изменением температуры [46]. Оно наблюдается при фазовых переходах: плавлении, парообразовании, отвердевании и т.д. [228, 361]. Также в работах зарубежных авторов отмечается сосредоточенность на одном определенном элементе баланса с его особенностями, или природном явлении, оказывающим влияние на изменение изучаемого параметра.

Изучению теплового баланса лесных сообществ уделяли внимание Н.А. Сурова [180], Н.А. Битюков [20]. Радиационным балансом как элементом теплового занимались Д.П. Акимова [4], В.А. Алексеева [5], Н.Н. Выгодская [39, 40], Н.В. Зукерт с соавторами [76], Н.А. Битюкова [19], И.С. Угарова [187].

Примером расчета элементов теплового баланса лесов и их описания в Крыму на региональном и локальном уровнях являются работы И.П. Ведя [31, 33, 34, 35]. Также в рамках комплексных исследований Юго-Восточного Крыма В.А. Боков описывал взаимодействие лесов с потоками тепла и радиации [114]. Однако комплексному подходу в изучении поступления солнечной радиации, радиационного баланса и его распределения на локальном уровне, в отдельных типах растительных сообществ, уделено недостаточно внимания.

Не смотря на различие отечественного и зарубежного подходов, их общей главной целью является изучение причинных закономерностей, определяющих метеорологический и гидрологический режим различных географических районов, что позволяет прогнозировать важные с практической точки зрения гидрометеорологические процессы и явления [29].

Теоретические основы изучения водного баланса территории Крымского полуострова заложены исследованиями М.А. Кочкина [109], К.Т. Логвинова и М.Б. Барабаш [90], В.А. Бокова с соавторами [114, 186]. В работе «Трансформация водного баланса в Крыму в XX веке – начале XXI века» [185] проанализированы изменения элементов водного баланса на территории Крыма под влиянием изменения климата и хозяйственной деятельности, динамика расходов воды, трансформация земельных угодий, рассматриваются особенности формирования водного баланса на

региональном и локальном уровнях, а также произведено районирование региона по характеру природного водного баланса, водопотребления, условиям использования транзитных и подземных вод. Предложены способы оптимизации водного баланса и качества воды с помощью физико-химических и ландшафтно-мелиоративных приемов. В настоящее время продолжаются работы по формированию методологии оценки водно-ресурсного потенциала Крымского полуострова [70, 112].

Примером расчета региональных и локальных характеристик водного баланса в Крыму могут служить работы В.А. Бокова с соавторами [114, 159, 186], А.В. Зуева с соавторами [75], Р.В. Горбунова с соавторами [56, 61], Л.М. Соцковой и В.О. Смирнова [177], В.О. Смирнова [172]. В работе [177] предложены подходы к информационно-картографической интерпретации трансформации водного баланса Крыма, а также рассмотрены особенности построения информационно-картографических баз данных трансформации статей приходной и расходной частей водного баланса, подходы к их созданию и использованию.

Расчеты суммарного испарения для районов Горного Крыма выполнены В.Н. Дублянским [69], водный баланс Главной гряды Крымских гор исследован в работе И.Г. Глухова [48]. Активно исследуется водный баланс ландшафтов бассейнов рек Крымского полуострова [6, 89, 184]. В тоже время, изучению водного баланса отдельных типов растительных сообществ на локальном уровне, произрастающих на территории Крымского полуострова, уделено крайне мало внимания [62, 95, 96, 151]. Отдельные работы посвящены оценке водного баланса растительных сообществ для сельскохозяйственного производства [63, 183].

Тема изменения климата и глобального потепления широко обсуждается обществом и научным сообществом как одно из самых актуальных направлений научно-технической деятельности, а также экономики и политики. Изменение климата с точки зрения его влияния на мировую экономику является первопричиной разнонаправленных изменений во многих

отраслях хозяйственной деятельности. Так же изменяющиеся климатические условия следует рассматривать не только как источник учащающихся стихийных бедствий, как негативных последствий, но и как возможность использовать разнообразие климатических условий страны.

Характер мышления и подходы к адаптации к климатическим изменениям сместились от реактивного реагирования на катастрофы к предупреждению и управлению рисками. Вопросами изменения климата и его влияния рассматриваются на разных уровнях и в разных аспектах, например возникновение погодных аномалий, смещение климатических зон и др. Для изучения, контроля и формулировки предложений формируются межправительственные научные коллективы, особенно важным аспектом изменения климата является его влияние на ландшафты.

В настоящее время этой проблемой занимаются ведущие институты во многих развитых и развивающихся странах, а также практически все международные организации осуществляют программы сотрудничества по решению проблемы глобального потепления. Теоретическая сторона вопроса охватывает все масштабные уровни от глобального до локального. При этом нет общепринятой методологии прогнозирования изменений, начиная от построения линии тренда на основе многолетних наблюдений температуры, до усложнения расчетов дополнительными факторами, такими как политика социально-экономического развития стран.

Помимо Общего понимания исследования носят и стратегический характер, влияя на лесохозяйственный и сельскохозяйственный сектора. В Крыму леса выполняют разнообразные функции, такие как охранные лечебно-оздоровительных территорий, населенных пунктов, противозрозионные, рекреационные, лесопарковые, заповедники, имеющие научное и историческое значение [82].

В России влияние изменение климата рассматривают с точки зрения развития болезней растений [4], фенологического отклика растений [137, 167], адаптации и стрессоустойчивость видов [86, 191]. Малая часть работ

анализируют влияние климата на распространение видов [1], больший упор идет на реакцию растений в выбранной точке и формирование на полученных результатов маркеров, указывающих на изменения на других территориях.

Зарубежные ученые пошли по другому пути, где на основе прогноза будущего изменения климата моделируется состояние растительного сообщества. Необходимость побудила к разработке инструментов прогнозирования для предоставления количественных сценариев для руководства принятием решений.

Китайские ученые сосредоточились на конкретных породах деревьев, обусловленных экономической и экологической значимости этого рода, и при изучении потенциального распространения трех видов лиственницы использовались 18 экологических переменных, которые отражают климат, топографию и почвенные условия района исследования. Результаты показали, что для разных видов, относящихся к одному роду, основной лимитирующий фактор существенно разнится [289].

Ряд ученых использует определенные виды как маркеры изменения климата и смещения климатических зон, в качестве примера использовали оливковое дерево для средиземноморского типа климата [332].

Также различные климатические модели применяют для моделирования и картирования потенциально подходящей среды обитания заранее заданного конкретного вида растения на заданной территории [328, 354]. Они основываются на связи возникновения видов с климатическими переменными, при условии, что обнаруженные связи сохранятся в будущем [252], некоторые из них включают в себя эмпирико-статистические данные национальных инвентаризаций, что с помощью дополнительных инструментов обработки помогло надежно спрогнозировать местообитание для более чем 100 отдельных видов растений [287]. Так же при прогнозе последствий изменения климата могут использоваться несколько моделей одновременно, дополняя друг друга при правильной интерпретации [288].

Результаты прогнозов распространения видов в условиях изменения климата используются в том числе для планирования природоохранных мероприятий и создания заповедников [390]. При этом отмечается, что важно учитывать не только природные факторы, но и возможность инвазивных видов и изменения землепользования на рассматриваемой территории, эти три доминирующих фактора оказывают влияние друг на друга [323].

Управление лесами вне зависимости от их назначения в постоянно изменяющемся мире требует прогнозирования, для поддержки планирования и принятия решений. Различные модели выдают отличные друг от друга результаты, основанные на различных подходах и предположениях о взаимодействии между экологическими процессами и тремя ключевыми показателями изменения климата: влажностью, температурой и CO₂.

Научными коллективами [373] ставятся перед собой вопросы выбора наиболее подходящей модели для прогнозирования, выявление общих закономерностей изменения растительности, которые могут быть полезными для принятия решений в планировании и управлении, понимание сильных и слабых сторон и ограничений различных моделей. Таким образом, разработчики моделей могут планировать улучшение своих моделей для обеспечения решения актуальных задач.

Существуют несколько концепций работы моделей, например статистические модели распределения видов фокусируются на статистических связях. Они прогнозируют пригодность среды обитания на основе исторического и текущего климата/места; нечувствительны к CO₂ и новым конкурентным связям; реликтовые или редкие виды могут быть неточными.

Также существуют:

- модели «разрывов» (Модели на основе отдельных особей, имитирующие взаимодействия и динамику на небольшом участке земли. Имитируется рост, развитие и смерть особей одного или нескольких видов на участке);

- модели ландшафтов (моделирование динамического взаимодействия растительности, нарушений и климата в пространственной области; моделирование пространственного процесса, длительное время моделирования);
- биогеохимические модели (моделирование основных циклов и потоков питательных веществ: H_2O , C (NPP и т. д.), N, P, следовые газы (N_2O , NO_x), динамика воды и температуры в месячные и дневные периоды);
- динамические глобальные модели растительности (моделирование ключевых физиологических процессов для определения типа растительности (травы, кустарника и дерева) и покрова на основе ежемесячных климатических условий, включая CO_2 ; использует эмпирические и фундаментальные физиологические процессы (масштаб листа сверху) для моделирования LAI; эвристическая модель для назначения физиогномического класса покрытия; при крайне низком масштабе будет напоминать модель разрыва; включение биогеохимического подхода).

Как было показано, исследования в области формирования и функционирования лесных горных ландшафтов представляют собой активно развивающуюся область науки. В рамках Крымского полуострова, который обладает богатыми природными условиями и уникальным биоразнообразием, изучение лесных горных ландшафтов приобретает особую важность. Однако большинство отечественных исследований в этой области склонны фокусироваться на региональном уровне, уделяя меньше внимания топологическим аспектам. Такой подход, несмотря на свою значимость, ограничивает возможность понимания локальных особенностей структуры и функционирования лесных горных ландшафтов. Поэтому имеется необходимость в проведении более детальных исследований лесных горных ландшафтов на обоих уровнях – и региональном, и топологическом. На региональном уровне следует углубить анализ влияния климатических, геологических и биологических факторов на формирование ландшафтов, а также изучить взаимодействие лесных ландшафтов с окружающей средой в

различных частях полуострова. С другой стороны, на топологическом уровне необходимо уделить внимание изучению локальной структуры лесных горных ландшафтов, их климатическим особенностям, распределению растительности и видового состава. Такие подробные исследования позволят выявить мельчайшие нюансы в функционировании этих ландшафтов, что, в свою очередь, окажется важным для разработки устойчивых стратегий управления природными ресурсами и сохранения биоразнообразия. Таким образом, осуществление комплексных исследований лесных горных ландшафтов на Крымском полуострове на обоих уровнях – региональном и топологическом – расширяет понимание об уникальных природных процессах в пределах горных лесных ландшафтов Крымского полуострова.

1.2. Факторы формирования и условия функционирования низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма

На территории Крымского полуострова субтропические лесные ландшафты представлены в основном пушистодубовыми и можжевельновыми формациями с примесью держи-дерева, скумпии кожевенной, грабинника (граб восточный). Эти сообщества представлены от побережья до высоты 300–350 м, где они либо сменяются типичными пушистодубовыми лесами и их производными с примесью грабинника и выше скальnodубовыми лесами с примесью грабовых и ясеневых лесов, либо поднимаются до края южного обрывистого известнякового склона яйлы.

Эти сообщества представлены, как правило, шибляковыми зарослями — густым низкорослым, труднопроходимым лесным массивом, либо, наоборот, разреженными редколесьями. Данные леса сформированы на границе своего ареала и обязаны своим формированием эффекту субтропического климата, который здесь формируется за счет циркуляционной позиции Южного берега Крыма. Северные холодные воздушные массы сюда не проникают, а южные и юго-западные задерживаются на склонах южной экспозиции Главной гряды Крымских гор. Юго-Восточный Крым, вместе с тем, находится в циркуляционной и инсоляционной тени формируемой Главной грядой, что определяет высокую засушливость региона.

1.2.1. Географическое положение

Район исследования располагается в юго-восточной части Крымского полуострова (рисунок 1.1).

Понятие «Юго-Восточный Крым» часто встречается в научных публикациях. Однако чёткие границы этого региона до сих пор не определены.

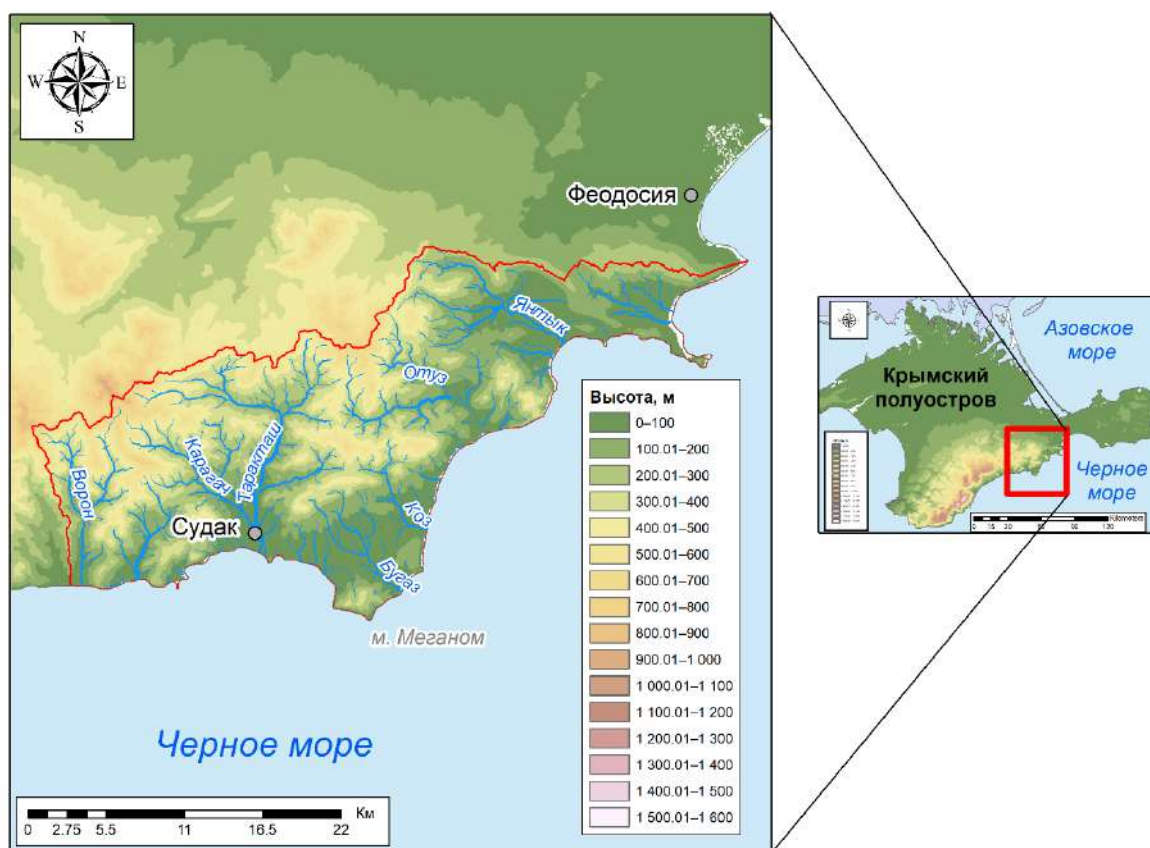


Рисунок. 1.1 – Географическое положение района исследования.

Анализ публикаций показывает, что к Юго-Восточному Крыму авторы чаще всего относят территорию городских округов Судак и Феодосия. Однако они не связывают его выделение с административными единицами, а скорее с ландшафтными особенностями. Границы района приводятся по работе [114], с незначительными корректировками в силу того, что в [114] приводится картосхема границ. Уточнение границ произведено по линиям водоразделов, которые выступают естественными границами исследуемого района. Западная граница района проходит по водоразделу между реками Ворон и Шелен – хребту Голлер, вершинам Пиякья, Биюк-Криж, Ливаз-Кая. Северная граница проходит по главному водоразделу, разграничивающему бассейны рек, впадающие в Черное (несущие свои воды в южном направлении) и Азовское моря (несущие свои воды в северном направлении). Северная граница проходит по скалам Юван-Кая, хребту Хамбал, г. Кукушлу-Оба, г. Казас-Олан, г. Апалы, хребту Туар-Алан, г. Джады-Кая. Северо-восточная и восточная

граница проходит по линии – г. Кара-Оба, хребту Узун-Сырт, хребту Тепе-Оба и заканчивается в районе м. Ильи.

Площадь района исследования составляет 567,8 км², а протяженность границы составляет 164,2 км. На севере от Юго-Восточного Крыма находятся отроги Крымских гор постепенно переходящие в Присивашскую низменность, на востоке – Крымские горы, на западе – Феодосийский залив и прилегающие равнины. Существенное воздействие оказывает расположенное на юге Черное море, протяженность границы с которым составляет около 80 км.

1.2.2. Геологическое строение и рельеф

Рассмотрим более детально влияние геологического строения и рельефа на распространение субсредиземноморских лесных сообществ на территории Юго-Восточного Крыма.

Существует довольно большой спектр взглядов на геологическое строение юго-восточной части Крымского полуострова, в виду сложного строения и сложной истории формирования.

Согласно геологической карте Горного Крыма, изданной в 1984 г. под редакцией Н.Е. Деренюк [45], Юго-Восточный Крым довольно четко обособливается в геологическом отношении. Северная и северо-восточная граница Юго-Восточного Крыма находится на стыке меловых и палеогеновых отложений, юго-западная граница проходит по титонским отложениям юры, а западная граница находится на стыке верхнеюрских и нижнеюрских отложений.

М.В. Муратов [132] указывает, что большая часть Юго-Восточного Крыма находится в пределах Судакского синклинория и Судакско-Карадагской складчатой страны, а окраины частично попадают в Туакский антиклинорий и синклинорий восточного Крыма.

По [9], исследуемая территория в тектоническом отношении полностью расположена в пределах Горно-Крымского альпийского складчатого надвигового сооружения. Дочетвертичные отложения исследуемого района представлены в основном юрскими отложениями. Здесь преобладают юрские

известняки, песчаники, глины. Встречаются триасовые отложения таврической серии (песчано-глинистый флиш), а также триасовые аргиллиты и глины. В.В. Юдин [199] указывает, что в районе Карадага представлены магматические породы (андезиты, базальты, туфы) среднеюрского возраста.

Четвертичные отложения представлены нерасчлененными элювиальными и делювиально-коллювиальными плиоцен-нижнечетвертичными отложениями. В районе полуострова Меганом распространены делювиально-пролювиальные четвертичные отложения. В долинах рек и водотоков широко представлены аллювиальные отложения.

В целом тектонические и геологические условия оказывают влияние на растительные сообщества в большей степени опосредовано – через рельеф местности, который сформировался в силу геологических и тектонических условий. Можно сказать, что в пределах рассматриваемого района прослеживается только частичная связь произрастания буковых и грабовых лесов на верхнеюрских отложениях. М.А. Кочкин [109] отмечает, что известняки, по сравнению с другими породами, являются менее пригодными для развития почвенного и растительного покрова в силу слабого расчленения рельефа, сложенного известняками и слабого накопления продуктов разрушения породы. При анализе геологической информации отчётливо видно, что в Юго-Восточном Крыму имеется большое количество выходов коренных пород в результате чего над ними невозможно формирование устойчивого лесного покрова и здесь формируются либо участки без растительных сообществ, либо крайне бедные степные сообщества.

Рельеф Юго-Восточного Крыма представлен горными хребтами в центральной и западной части, и постепенно переходит в равнину на востоке. По данным цифровой модели рельефа Copernicus DEM (пространственное разрешение 30 м/пиксель) абсолютные высоты района изменяются от –4 до 917 м (рисунок 1.2).

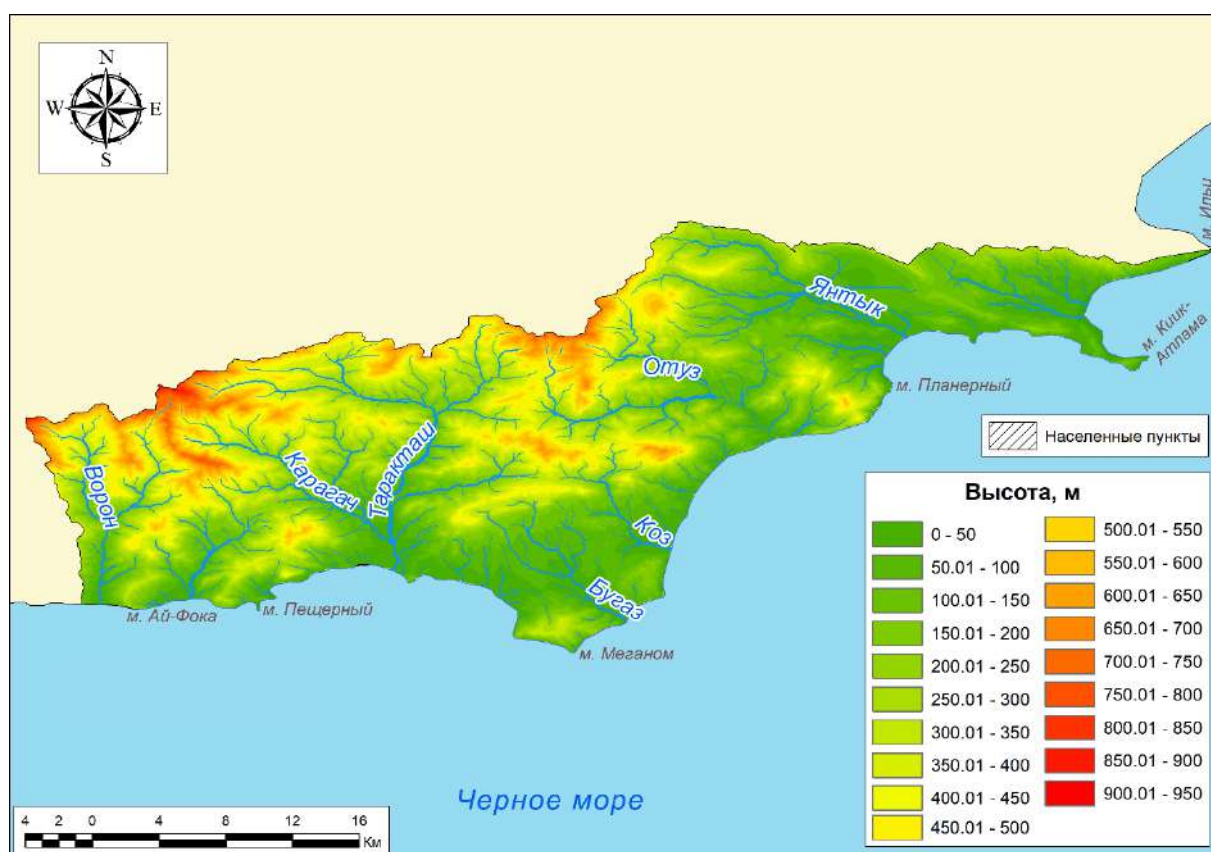


Рисунок 1.2 – Абсолютные высоты Юго-Восточного Крыма

Лесные сообщества главным образом представлены в западной и центральной части Юго-Восточного Крыма, на наиболее возвышенных участках территории. Рельеф района постепенно понижается с северо-запада на юг и юго-восток. Минимальные отметки абсолютных высот характерны для побережья Феодосийского залива.

Рельеф и его количественные характеристики оказывают влияние на распределение растительных сообществ в пределах Юго-Восточного Крыма. Можно утверждать, что степные сообщества в пределах Юго-Восточного Крыма занимают самые низкие участки (при этом средние значения высоты здесь составляют около 100 м), более высокие положения занимают дубовые шибляки со средним значением высоты в 230 м, затем – пушистодубовые леса (среднее значение высоты примерно 285 м), скальдубовые леса (среднее значение высоты примерно 340 м) и наивысшее значение – грабово-буковые леса (среднее значение абсолютных высот примерно 470 м).

Наклон поверхности в пределах Юго-Восточного Крыма изменяется от 0 до 69,2 градуса. Среднее значение наклона поверхности в пределах Юго-Восточного Крыма составляет 13,9 градуса (рисунок 1.3). А.А. Клюкин [93] отмечает, что из-за сложного рельефа в Юго-Восточном Крыму могут формироваться бедленды.

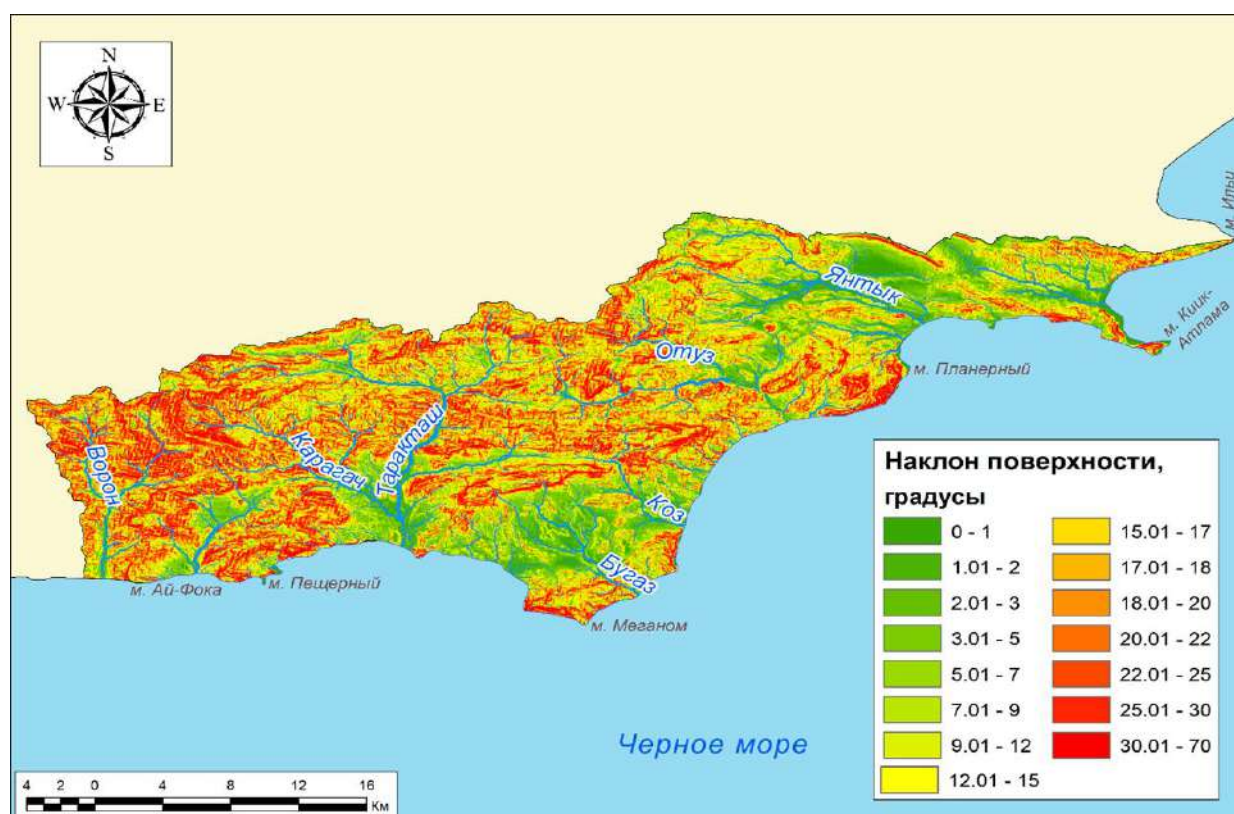


Рисунок. 1.3 – Наклон поверхности в пределах Юго-Восточного Крыма

Наибольшие значения наклона поверхности характерны для восточной и северной частей Юго-Восточного Крыма, а наименьшие – для западной (особенно в долине реки Янтык).

Глубина расчленения рельефа (рисунок 1.4) в пределах рассматриваемого района изменяется от 0 до 446 м. 73 % территории Юго-Восточного Крыма характеризуются глубиной расчленения рельефа от 100 до 300 м/км², и только около 7 % – глубиной расчленения более 300 м/км². Густота расчленения рельефа колеблется от 0 до 3,5 км/км² (рисунок 1.5).

Наибольшее количество значений густоты расчленения рельефа в пределах района приходится на диапазон значений от 0 до 1 км/км².

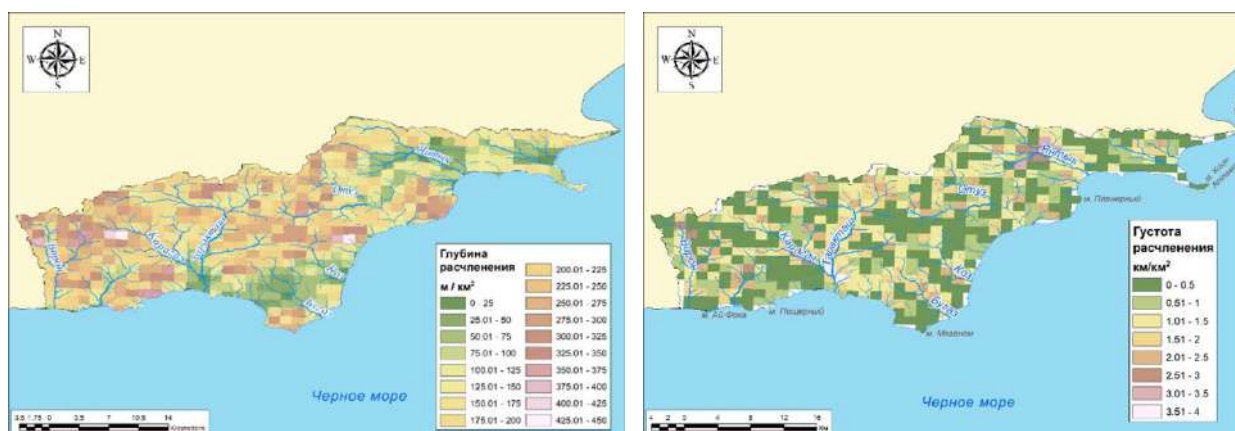


Рисунок 1.4 – Глубина расчленения рельефа (слева) и густота расчленения рельефа (справа) в пределах Юго-Восточного Крыма

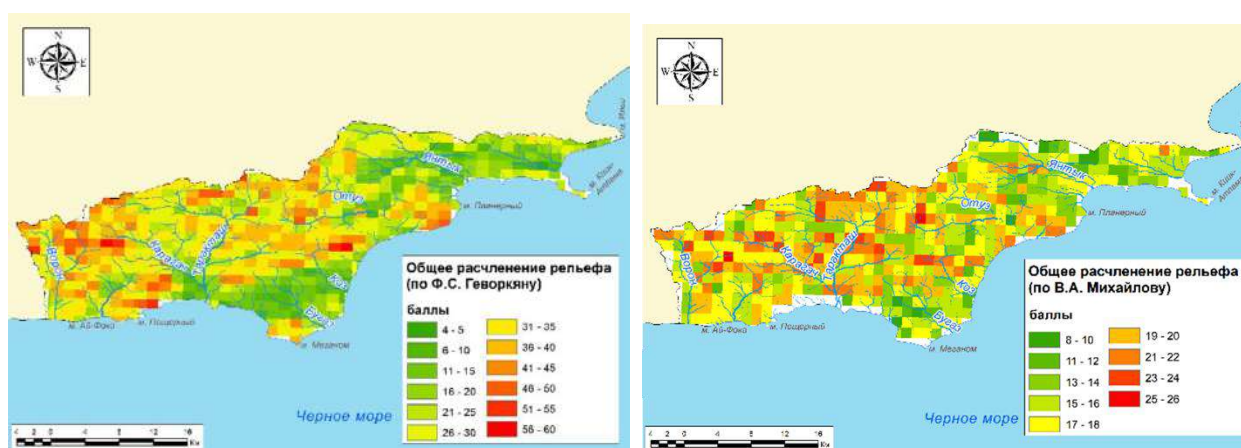


Рисунок 1.5 – Общее расчленение рельефа в пределах Юго-Восточного Крыма: по Ф.С. Геворкяну (слева) и по В.А. Михайлову (справа)

Общее расчленение рельефа для района исследования, рассчитанное по методике В.А. Михайлова [131], изменяется от 4 до 56 баллов, а по методике Ф.С. Геворкяна [44] – от 8 до 25 баллов. При этом, результаты, полученные для обеих методик, констатируют тот факт, что общее расчленение рельефа уменьшается с запада на восток (рисунок 1.5).

В целом в пределах рассматриваемого района территории с минимальным расчленением рельефа покрыты степными, псаммофитными и

галофитными сообществами, в то время как территории с наибольшим расчленением рельефа покрыты лесными сообществами.

Стоит также отметить, что склоны Юго-Восточного Крыма подвержены эрозионным процессам и в том числе оврагообразованию, что определяет перераспределение лесов по склонам. Большую роль в пространственной дифференциации лесов играют снегосборы. Рассчитанный для Юго-Восточного Крыма индекс мощности линейной эрозии SPI (Stream Power Index) показывает, что большая часть Юго-Восточного Крыма подвержена сильным эрозионным процессам (рисунок 1.6).

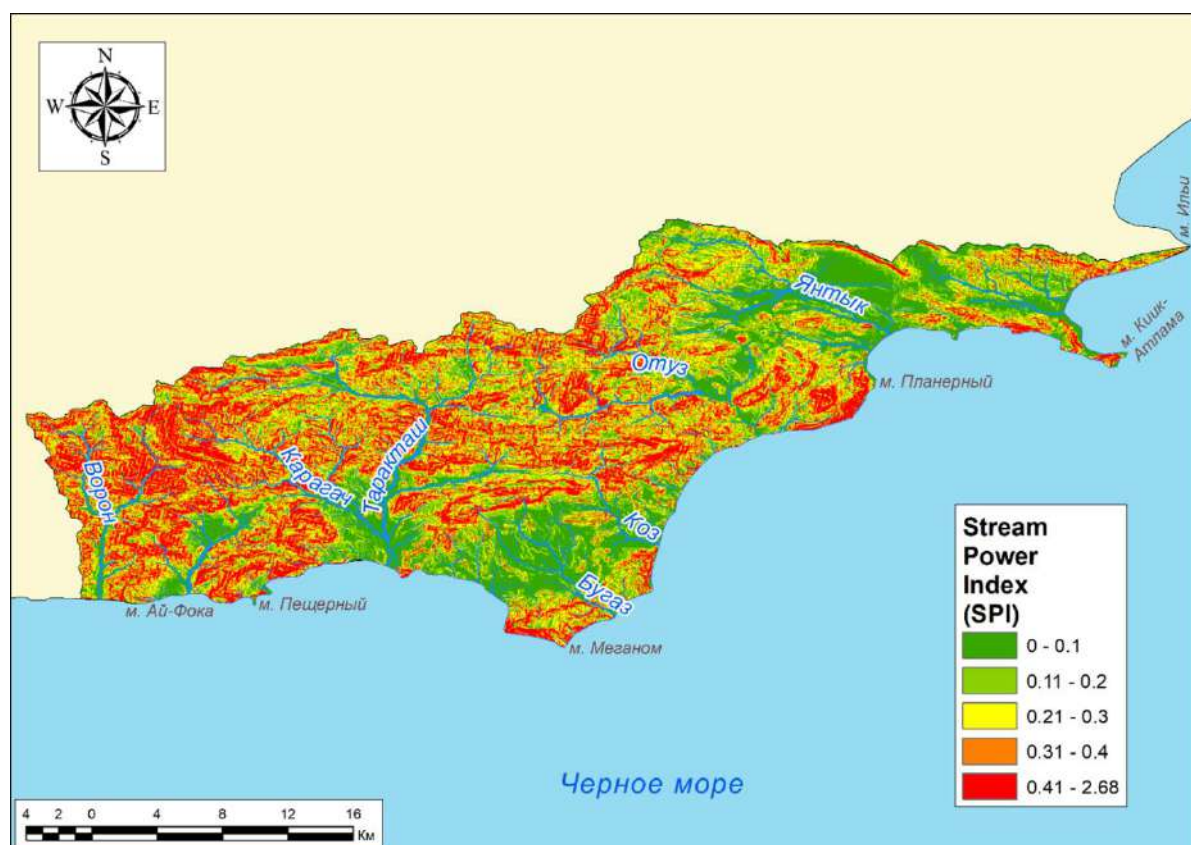


Рисунок 1.6 – Значения индекса мощности линейной эрозии SPI (Stream Power Index) в пределах Юго-Восточного Крыма

1.2.3. Климат

В работе [114] отмечается, что территория Юго-Восточного Крыма характеризуется средиземноморскими чертами климата. Однако, несмотря на

это, многие авторы, например [1], указывают, что в Юго-Восточном Крыму сильные морозы, средние минимумы температур и минимальные температуры в отдельные годы являются сильным лимитирующим фактором для развития субтропической растительности.

По [9] среднегодовая температура воздуха в пределах Юго-Восточного Крыма увеличивается от 8 до 12 градусов Цельсия с северо-запада на юго-восток и с запада на восток. Согласно [2] на метеостанции города Феодосия за год выпадает 512 мм осадков, в теплый период – 297 мм, а в холодный период – 215 мм. В тоже время, согласно [2], максимальное количество выпадающих осадков в год здесь составляет 700 мм, а минимальное – 265 мм. Среднегодовая температура составляет 12,1°C [2].

Согласно [114] в Юго-Восточном Крыму за зимний период выпадает от 150 до 400 мм осадков, причем наибольшее количество осадков выпадает в северо-западной части района исследования, а поле осадков уменьшается с запада на восток. В летний период над территорией Юго-Восточного Крыма выпадает от 300 до 150 мм осадков, поле осадков уменьшается с северо-запада на юго-восток. И в зимний, и в летний период наиболее засушливыми районами являются прибрежные участки территории Юго-Восточного Крыма (рисунок 1.7). Годовое распределение количества выпадающих осадков изменяется от 700 до 350 мм в направлении с запада на восток и с северо-запада на северо-восток.

Распределение полей климатических факторов влияет на формирование растительного покрова. В наиболее возвышенных участках территории Юго-Восточного Крыма преобладает наибольшее количество выпадающих осадков и малые температуры, в результате чего здесь развиты в основном грабовые и буковые леса. При уменьшении количества выпадающих осадков происходит постепенное вытеснение древесной растительности кустарниковыми и степными сообществами. Дубовые шибляки и типчаковые степи характерны для территорий, где выпадет наименьшее количество осадков.

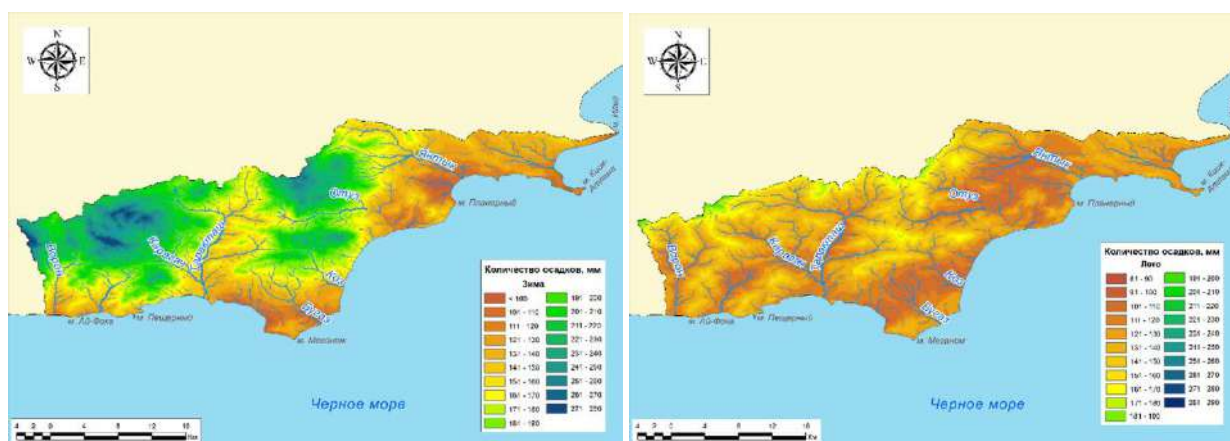


Рисунок 1.7 – Среднегодовое количество осадков на территории Юго-Восточного Крыма за зимний (а) и летний (б) периоды, мм

В пределах территории Юго-Восточного Крыма, как и любой территории Северного полушария, распределение полей температуры во времени подвержено смене циркуляционных эпох и периодов. В Юго-Восточном Крыму наблюдается существенные изменения среднегодовых значений поля температуры воздуха и количества выпадающих осадков (таблица 1.1, 1.2).

Как видно из таблиц, наблюдается рост количества выпадающих осадков, а также минимальных, максимальных и средних температур воздуха, что создает предпосылки для увеличения испарения.

Большое влияние на пространственную дифференциацию растительности по склонам оказывает перенос снега. Данный процесс достаточно широко развит в условиях сильно расчлененного рельефа, где есть возможность формирования снеговосборов. Перенос снега при метелях чаще всего имеет место при северо-восточных потоках воздуха. Это приводит к накоплению снега на склонах юго-западной экспозиции, формируя на них условия для развития древесно-кустарниковой растительности, тогда как склоны северных экспозиций характеризуются в большей степени степными сообществами (Боков, Горбунов, 2011).

Таблица 1.1 – Годовое количество осадков в Юго-Восточном Крыму

	Осадки, мм				
	Минимум	Максимум	Амплитуда	Среднее	Стандартное отклонение
Зональная циркуляционная эпоха	350,2	819,3	469,1	544,1	93,8
1 период меридиональной южной циркуляционной эпохи	386,2	828,6	442,4	566,1	85,3
2 период меридиональной южной циркуляционной эпохи	331,7	838,6	506,9	513,9	82,8
3 период меридиональной южной циркуляционной эпохи	381,9	817,1	435,2	542,7	74,4
4 период меридиональной южной циркуляционной эпохи	431,8	871,0	439,2	589,9	81,2

Таблица 1.2 – Среднегодовая температура воздуха в Юго-Восточном Крыму

	Температура, °С				
	Минимум	Максимум	Амплитуда	Среднее	Стандартное отклонение
Зональная циркуляционная эпоха	7,9	11,7	3,8	10,5	0,8
1 период меридиональной южной циркуляционной эпохи	8,4	12,1	3,7	10,9	0,8
2 период меридиональной южной циркуляционной эпохи	8,3	12,0	3,7	10,8	0,8
3 период меридиональной южной циркуляционной эпохи	8,2	12,0	3,8	10,8	0,8
4 период меридиональной южной циркуляционной эпохи	9,1	12,9	3,8	11,7	0,8

1.2.4. Водные объекты

Густота речной сети в пределах Юго-Восточного Крыма уменьшается с юго-запада на северо-восток от 0,3 до 0,1 км/км² [161]. Косвенно этот показатель связан с увеличением засушливости климата и уменьшения количества выпадающих осадков. Водотоки Юго-Восточного Крыма полностью относятся к рекам южного макросклона Крымских гор. В таблице

1.3 представлены среднегодовое характеристики годового стока рек Юго-Восточного Крыма, впадающих в Черное море.

Таблица 1.3 – Среднегодовое характеристики годового стока рек Юго-Восточного Крыма [152, 182] (Q – расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$); W – объем стока (м^3); M – модуль стока ($\text{л}/\text{с км}^2$); h – слой стока (мм); C_v и C_s характеристики изменчивости годового стока; ζ_Q – ошибка вычисления среднегодового значения стока).

Река гидропост	Площадь, км^2	Средняя высота, м	Период работы	Среднегодовое значения						
				Q	W	M	h	C_v	C_s	ζ_Q
1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12
Ворон с. Ворон	10,3	500	с 1964	0,028	0,881	2,72	85	1,11	1,95	20
Ай-Серез с. Междуречье	12,8	480	с 1964	0,015	0,504	1,17	38	1,03	1,23	17
б. Скалистая с. Междуречье	0,32		с 1985	0,001	0,032	3,12	100	0,64	1,19	16
Таракташ г. Судак	156	340	с 1937	0,112	3,50	0,7	23	1,22	1,46	17
Отуз пгт Щебетовка	58,0	340	с 1970	0,069	2,17	1,19	38	1,06	1,53	20
руч. Кизилташский пгт Щебетовка	35,0	370	с 1971	0,037	1,16	1,05	33	1,30	2,35	24
руч. Кабакташский пгт Щебетовка	22,0	330	1915– 1970	0,02	0,62	0,91	28	1,32	1,41	18

О современном режиме рек позволяют судить данные семи гидропостов. В то же время речная сеть здесь довольно сложная, и в целом территория представляет собой сочетание речных долин, междуречий и водораздельных пространств.

Стоит также отметить, что на побережье Юго-Восточного Крыма сформировались условия существования отдельных малых водосборов мелких балок и эрозионных форм в силу наличия сложного пересеченного рельефа, что создает уникальные топологические условия для существования растительных сообществ. Например, в пределах долин водотоков локальные факторы нарушают проявление квазизональных процессов – повсеместно встречаются помимо дубовых сообществ также сообщества из тополя и ивы.

Территория Юго-Восточного Крыма подвержена активным селевым процессам [138]. От поселка Рыбачье до Судака – сильной степенью селевой опасности, от г. Судак до пгт. Курортное – сильной и средней степенью селевой опасности. В целом на территории преобладают проявления водно-мелкоглыбовых селей. Все это вносит свой вклад в развитие лесных сообществ на рассматриваемой территории.

1.2.5. Почвы

Почвообразующими породами на большей части Юго-Восточного Крыма выступают сланцевый элювий, песчаники, конгломераты и галечники, а в районе горного массива Карадаг преобладает элювий вулканических пород [155]. В пределах Юго-Восточного Крыма представлены скелетные почвы, формирующиеся на продуктах выветривания пород таврической серии, известняков, мергелей, интрузивных и эффузивных пород. Территория крайне разнообразна по почвообразующим породам, а соответственно, по лесорастительным условиям.

Н.А. Драган [67] на почвенной карте Крымского полуострова в пределах Юго-Восточного Крыма выделяет коричневые почвы сухих лесов и кустарниковых степей (вдоль побережья Черного моря), дерновые карбонатные почвы и бурые горно-лесные почвы (в центральной части Юго-Восточного Крыма), черноземы слитые солонцеватые в комплексе с солонцами (в восточной части Юго-Восточного Крыма в районе города Феодосия).

Подробная характеристика почвенного покрова Юго-Восточного Крыма (масштаб 1:200000) приводится в [155], однако в силу неизученности части территории почвенное картографирование для Юго-Восточного Крыма в [155] выполнено не полностью. Согласно Почвенной карте УССР [155] в пределах Юго-Восточного Крыма преобладают коричневые горные почвы сухих лесов и кустарников щебневатые на элювии и делювии коренных пород.

Современный этап почвенного картографирования выполнен для Юго-Восточного Крыма Е.Ю. Сухачевой, Я.С. Ревинной [181] в рамках актуализации почвенной карты Южного берега Крыма. Хотя карта не покрывает всю территорию Юго-Восточного Крыма, можно наблюдать изменчивость почвенного покрова на большей части территории, к тому же достоинством этой работы является применение современной почвенной классификации и масштаб исследования 1:100000. По [181], в пределах Юго-Восточного Крыма почвенный покров состоит из преобладающей сложной мозаики петроземов, литоземов и коричневых почв с выходами коренных скальных пород и территорий, покрытых осыпями и обвалами в нижней части южного макросклона Крымских гор и буроземов в комплексе с другими почвами в верхней части южного макросклона Крымских гор. В пределах речных долин и под сельскохозяйственными угодьями повсеместно представлены почвы обрабатываемых земель – различные агрообраземы.

Почвенный покров наряду с другими факторами внешней среды оказывает влияние на формирование растительных сообществ. Коричневые почвы в нижней части южного макросклона Крымских гор в основном приурочены к дубовым редколесьям с томилярами и саваноидами или дубовым лесам из дуба пушистого (*Quercus pubescens*) или скального в классификации растительности по [9] или шибляковыми сообществами и типчаковыми степями по классификации [114]; бурые горно-лесные почвы в верхней части южного макросклона Крымских гор – к лесам из дуба пушистого и их производным в комплексе с грабинником или дуба скального в комплексе с грабом и ясенем. На различных вариантах черноземов в основном произрастают степные сообщества.

1.2.6. Растительный мир

В пределах Юго-Восточного Крыма сформировались уникальные растительные сообщества, которые несут в себе черты как лесного типа растительности, так и степного. К тому же пространственное распределение

довольно неоднородно и возможны сочетания различных сообществ, в том числе лесных со степными.

В работе [116] отмечается, что на южном берегу Крыма от берега моря и до высот 400–500 м простирается пояс из зарослей дуба пушистого и можжевельников с участием вечнозеленых и листопадных средиземноморских растений, таких, как дикая фисташка туполистная, земляничное дерево, иглица колючая, плющ обыкновенный и т.п.

М.А. Кочкин [109] указывает на то, что в приморской части южного склона Главной гряды Крымских гор, в том числе и в Юго-Восточном Крыму, имеет преобладающее распространение дуб пушистый (*Quercus pubescens* Willd). Здесь он произрастает над уровнем моря на высоте от 20 до 450–500 м. Дуб пушистый – засухоустойчивый вид. Он распространен на территориях с количеством осадков 300–400 мм в год и на южных склонах, где выпадает 400–550 мм осадков, которые быстро испаряются, и ежегодно наблюдается летом засушливый период 2–3 месяца.

Н.И. Рубцов с соавторами [163] указывают, что в Юго-Восточном Крыму преобладают растительные сообщества (шибляки) главным образом из дуба пушистого и грабинника, а также дубовые леса. Согласно Я.П. Дидуху [66] практически в пределах всего Юго-Восточного Крыма представлены леса из дуба пушистого, а в районе г. Феодосия – ковыльные настоящие степи предгорий. В работе [66] приводится более подробная карта растительности Юго-Восточного Крыма. Большую часть территории в прибрежной части южного макросклона Крымских гор занимают редколесья из дуба пушистого в комплексе с томилярами и саваноидами, а выше по склону – пушистодубовые леса с грабинником. В районе западнее г. Судак представлены можжевеловые леса, в районе Карадага – пушистодубовые леса. Западнее г. Феодосия представлены пушистодубовые леса и типичные разнотравно-ковыльные степи.

Ю.В. Плугатарь [149] указывает, что на большей части территории Юго-Восточного Крыма преобладают дубовые леса и небольшие участки занимают сосновые и можжевеловые леса.

Л.Я. Гаркуша [42] приводит карту растительного покрова Горного Крыма, которая практически полностью захватывает район исследования (за исключением крайней восточной части). Согласно [42], растительный покров Юго-Восточного Крыма на западе включает дубовые, можжевело-дубовые, дубово-фисташковые леса, расположенные вдоль побережья, а также шибляки в комплексе с участками типчаковой растительности степного и фриганоидного типа, с сельскохозяйственными угодьями на их месте. В центральной части Юго-Восточного Крыма встречаются сельскохозяйственные угодья на месте пушистодубовых лесов и ковыльно-типчаково-разнотравных степей. В районе массива Карадаг представлены дубово-грабинниковые леса с участием можжевельника и смешанные сложного состава шибляки с посадками сосны, фисташки и др. пород, а также пушистодубовые леса. В верхней части южного макросклона Крымских гор в пределах Юго-Восточного Крыма развиты скальnodубовые и дубово-грабовые леса.

Согласно [114] в пределах Юго-Восточного Крыма выделяется два высотных пояса растительности, поднимающихся от побережья Черного моря к главному водоразделу Крымских гор. Нижнюю часть склона занимают очень сухие шибляки и аридные редколесья, а далее располагаются очень сухие и сухие можжевело-грабинниковые дубравы и судубравы.

При анализе литературных источников можно отметить, что большинство авторов придерживается мнения что в пределах Юго-Восточного Крыма преобладающими растительными сообществами являются заросли кустарников шиблякового типа в основном состоящие из дуба пушистого, часто в сочетании с грабинником и саванноидными и фриганоидными сообществами, а также степные сообщества в районе города Феодосия и восточнее его.

Также стоит отметить, что часто в Юго-Восточном Крыму растительный покров коренным образом преобразован и растительность представлена либо культурными аграрными видами, либо проходит стадии дигрессии и замещения.

Тип растительного покрова напрямую влияет на водный баланс территории в силу пропускной способности растительности, способности их удерживать и перераспределять влагу. Дополнительно на растительный и почвенный покров, а вместе с тем и распределение водного баланса оказывает воздействие животного мира. Для Юго-Восточного Крыма, к примеру, ярким примером этого является роющая деятельность кабана, которая имеет повсеместный характер и приводит к иссушению почвы, увеличивая испарение с ее поверхности. Этот фактор хорошо описан Л.П. Мироновой и Л.В. Знаменской [127].

Таким образом, факторы и условия внешней среды способствуют пространственной дифференциации ландшафтов и оказывают непосредственное воздействие на пространственную дифференциацию лесов Юго-Восточного Крыма.

1.3. Промежуточные выводы по разделу

Проведенный анализ теоретико-методологических подходов к изучению субсредиземноморских лесных ландшафтов, демонстрирует актуальность исследований в том числе и с точки зрения глобальных климатических изменений. Многообразие подходов к изучению обусловлено как историей развития территории, так и решаемых на ней задач. Подчеркивается важность региональных исследований, учитывающих специфические факторы формирования климата и особенности связей внутри ландшафтов. Рассмотренные исследования, проводимые в Крыму, служат важной основой для дальнейшего изучения динамики и функционирования субсредиземноморских лесных ландшафтов. Таким образом, теоретико-методологическая база ложится в основу решения задач, направленных на

выявление реакций субсредиземноморских лесных ландшафтов на климатические изменения, учитывая региональные особенности и локальные факторы, определяющие формирование климата.

Анализ теоретических представлений о функционировании субсредиземноморских лесных ландшафтов позволяет выделить ключевые процессы трансформации вещества и энергии, формирующие радиационный, тепловой, водный и вещественный балансы. Они определяют динамику лесных ландшафтов и формируют их индивидуальные стратегии, направленные на приспособление к изменяющимся условиям окружающей среды. Исследование динамики лесных ландшафтов и процессов трансформации вещества и энергии позволяет оценить реакцию субсредиземноморских лесных ландшафтов на региональные проявления климатических изменений, выявляя стратегии развития или стабилизации, формирующиеся под воздействием изменения климата.

Анализ формирования лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма выявил значительное влияние топографических особенностей, характерных для субсредиземноморских территорий. Сложный пересеченный рельеф с множеством малых водосборов, мелких балок и эрозионных форм создает уникальные условия для пространственной дифференциации растительных сообществ, которые нарушают проявление квазизональных процессов, приводя к формированию мозаичных комплексов растительности. В качестве примера может послужить формирование лесной растительности в нижних частях склона и влияние снегосборов.

Кроме того, специфика растительного покрова, определяющая пропускную способность, влагоудерживающую и влагораспределительную функции, оказывает непосредственное влияние на водный баланс территории. Особое значение для субсредиземноморских лесов Юго-Восточного Крыма имеет воздействие животного мира, в частности, роющая деятельность кабана. Этот фактор, широко распространенный в регионе, приводит к нарушению

почвенного покрова, его иссушению и увеличению испарения с поверхности, что, в свою очередь, влияет на распределение влаги в ландшафте.

При этом основным лимитирующим фактором развития субтропической растительности являются средние минимумы температур и сильные морозы в отдельные годы.

Таким образом, изучение формирования и функционирования лесных ландшафтов является ключевым для понимания их устойчивости в условиях климатических изменений. Совокупность факторов и условий внешней среды, включающая сложный рельеф, мозаичность растительного покрова и воздействие животного мира, обуславливает высокую пространственную дифференциацию лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма, формируя их уникальный облик и функциональные особенности. Это подчеркивает необходимость учета локальных факторов при анализе формирования и функционирования субсредиземноморских лесных ландшафтов.

РАЗДЕЛ 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Стационарные исследовательские площадки в различных типах лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма

В современной научной литературе особое внимание отводится использованию и непрерывному получению данных о состоянии окружающей природной и социально-экономической среды посредством их регистрации различными измерительными приборами и основанное на систематическом и непрерывном сборе данных. Использование разнообразных измерительных приборов, способных осуществлять непрерывную запись данных, дополняет этот процесс, делая исследование более полноценным и точным. Онлайн-мониторинг становится ключевым инструментом для получения данных в режиме реального времени. Этот метод позволяет исследователям непрерывно отслеживать изменения, происходящие в окружающей среде.

На территории Крымского полуострова мониторинговые ландшафтные исследования активно проводились в 60-е и 70-е гг. XX века [31, 33, 34, 35, 90, 109], однако затем их количество значительно уменьшилось, а после распада СССР они практически прекратились. Среди современных публикаций стоит отметить работы В.А. Бокова с соавторами [114, 115, 186], Т.В. Бобры [21, 22], Р.В. Горбунова с соавторами [60, 61], В.О. Смирнова [170, 172, 174].

В рамках одной из задач данного исследования являлось на основе полевых экспедиционных, полустационарных и стационарных методов исследования описать радиационный, тепловой и водный балансы различных типов лесных ландшафтов в условиях субсредиземноморского низкогорья. В рамках обозначенной задачи проводился выбор ключевых участков в различных лесных сообществах для установки на них блока метеостанции с дополнительным набором датчиков.

В качестве ключевых участков выбирались естественные лесные сообщества типичные для Юго-Восточного Крыма, расположенные на

территории Карадагского природного заповедника, как особо охраняемой природной территории (ООПТ).

2.1.1. Исследовательская площадка на восточном склоне хребта Беш-Таш

В пределах Карадагского заповедника функционирует Карадагский ландшафтно-экологический стационар (КЛЭС), включающий в себя территорию с типичными ландшафтами Юго-Восточного Крыма (рисунок 2.1, 2.2).

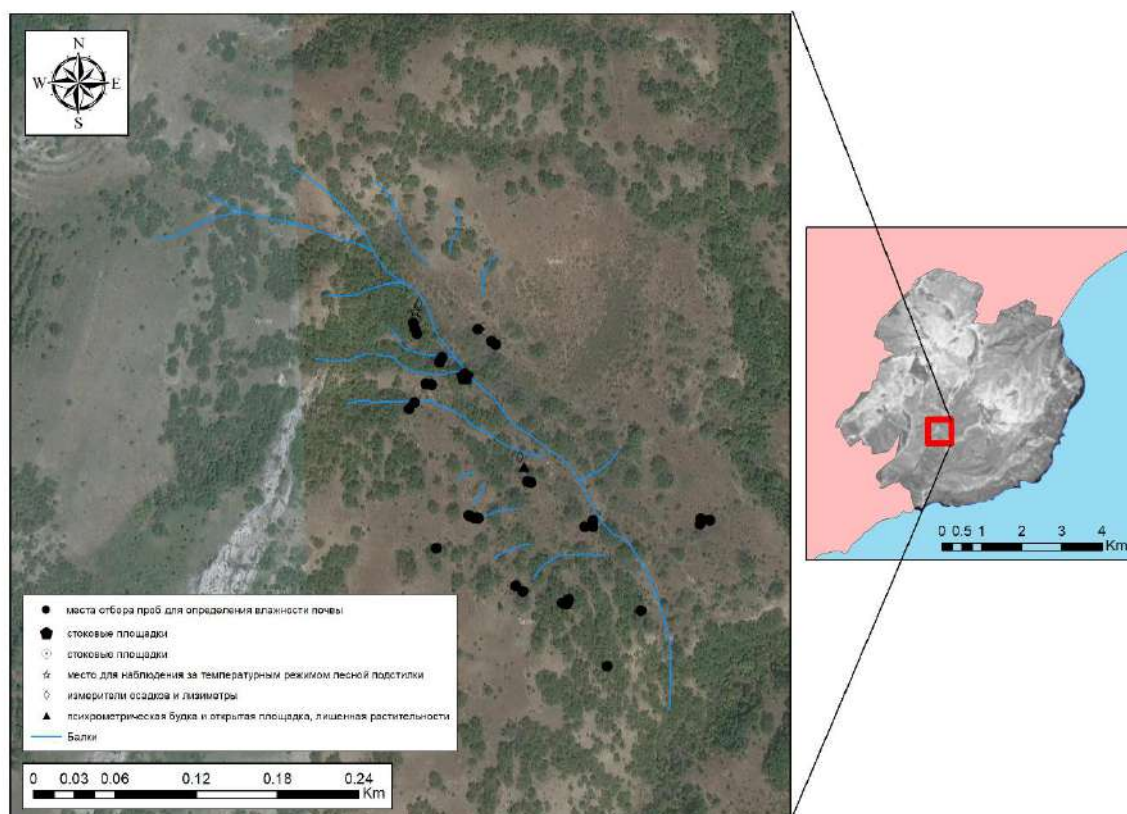


Рисунок 2.1 – Территория КЛЭС

Выбор территории КЛЭС осуществлялся на основании научно-методических критериев, в том числе типичность ландшафтно-экологических условий для Юго-Восточного Крыма и соответствие нормам, принятым для полигонов в международной сети станций экологического мониторинга [115].

Стационар расположен в пределах водосбора крупной балки (длина 0,6 км, площадь 17 га) на восточном склоне хребта Беш-Таш в 1,5 км от поселка городского типа Курортное.



Рисунок 2.2 – Территория КЛЭС (площадка для измерений)

На метеорологической площадке, расположенной на открытом участке в нижней части водосбора, измеряется количество выпавших осадков, влагозапас почвы. В средней части водосбора под пологом леса также установлены осадкоприемник и почвенные лизиметры. Наблюдения за влажностью почвы проводятся на 30 точках, расположенных на участках с лесной, кустарниковой и степной растительностью. Наблюдения за стоком проводится на двух стоковых площадках, заложенных в пределах стационара. Территория КЛЭС является репрезентативной для всего Юго-Восточного Крыма, так как здесь представлены практически все типы растительных

сообществ. Растительный покров характеризуется сильной мозаичностью, обусловленной в том числе расчлененностью рельефа. Более 20 % территории занимают лесные сообщества. Они представлены в основном пушистодубовой формацией с добавлением формации клена полевого, формации фисташки туполистной, сосны крымской. Кустарниковые сообщества занимают примерно десятую часть стационара и представлены формациями колючих кустарников – держи-дерева колючего, шиповника, тёрна или сливы колючей, ежевики крымской. Травянистые сообщества довольно разнообразны и занимают более 60 % территории стационара [114].

В рамках исследований на территории КЛЭС рассматривалась участок пушистодубового леса (рисунок 2.3, 2.4).

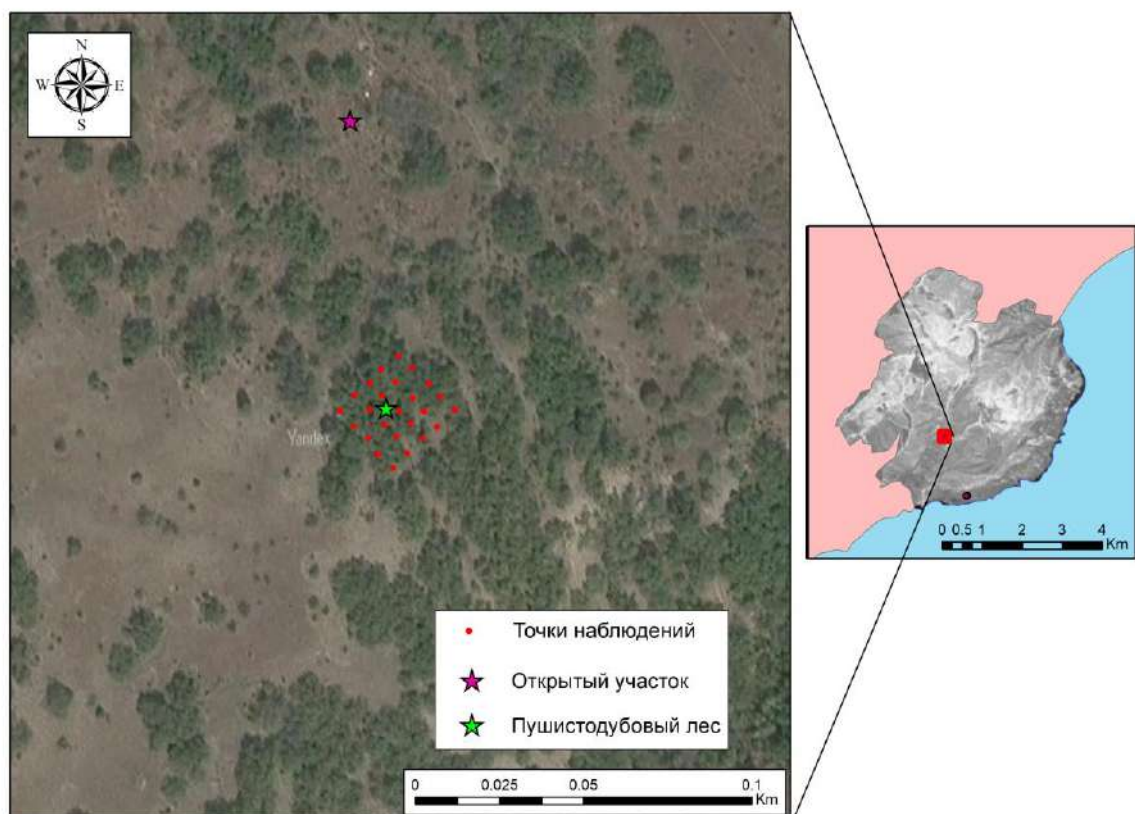


Рисунок 2.3 – Расположение ключевого участка пушистодубового леса на территории КЛЭС



Рисунок 2.4 – Фация пушистодубового леса в пределах территории КЛЭС

Она располагается на пологом склоне восточной экспозиции, представлена одним древесным ярусом дуба пушистого высотой в среднем 5 метров и диаметрами стволов около 20 см и грабинника высотой до 3,5 метра. Подрост молодых дубков высотой до 30 см встречается на всей исследуемой территории.

Кустарниковый ярус представлен скумпией кожевенной, кизилом обыкновенным и держи-деревом колючим. Травы представлены следующими видами: ясенец голостолбиковый, смолёвка густоцветковая, василёк козий, овсяница Калье.

Прилегающая степная фация представлена мезофитными травянистыми сообществами, среди которых дубровник обыкновенный, эгонихон пурпурно-голубой, гравилат городской и некоторые другие.

2.1.2. Исследовательская площадка на южном склоне хребта Карагач

В качестве второго рассматриваемого участка для наблюдений выступает можжевельниковое сообщество, которое занимает крутой (до 45°) южный склон хребта Карагач, частично выходя на гребень (рисунок 2.5, 2.6). Стоит отметить, что на всей территории Юго-Восточного Крыма можжевельниковые сообщества произрастают исключительно на южном макросклоне. В древесном ярусе здесь наряду с можжевельником высоким произрастают, местами доминируя, дуб пушистый и фисташка туполистная, а также каркас голый, ясень остроплодный, рябина греческая, клен полевой, держи-дерево колючее, груша лохолистная.

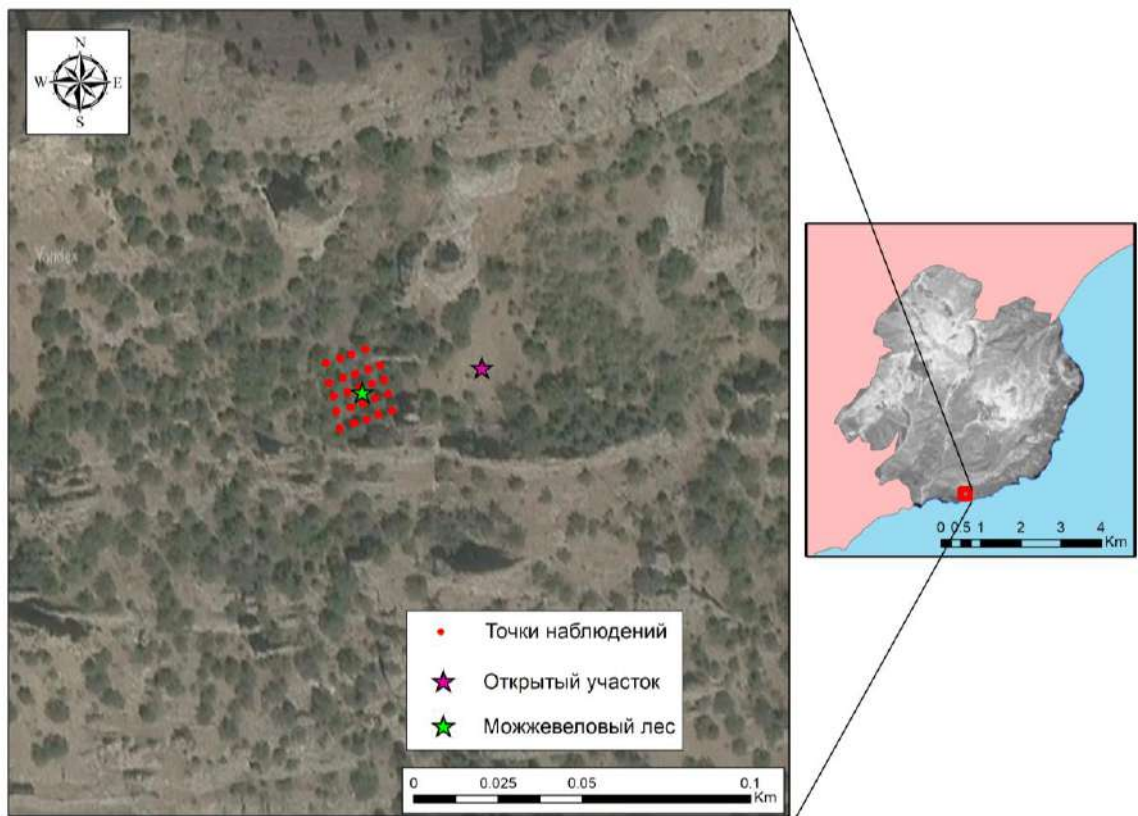


Рисунок 2.5 – Исследовательская площадка на южном склоне хребта Карагач

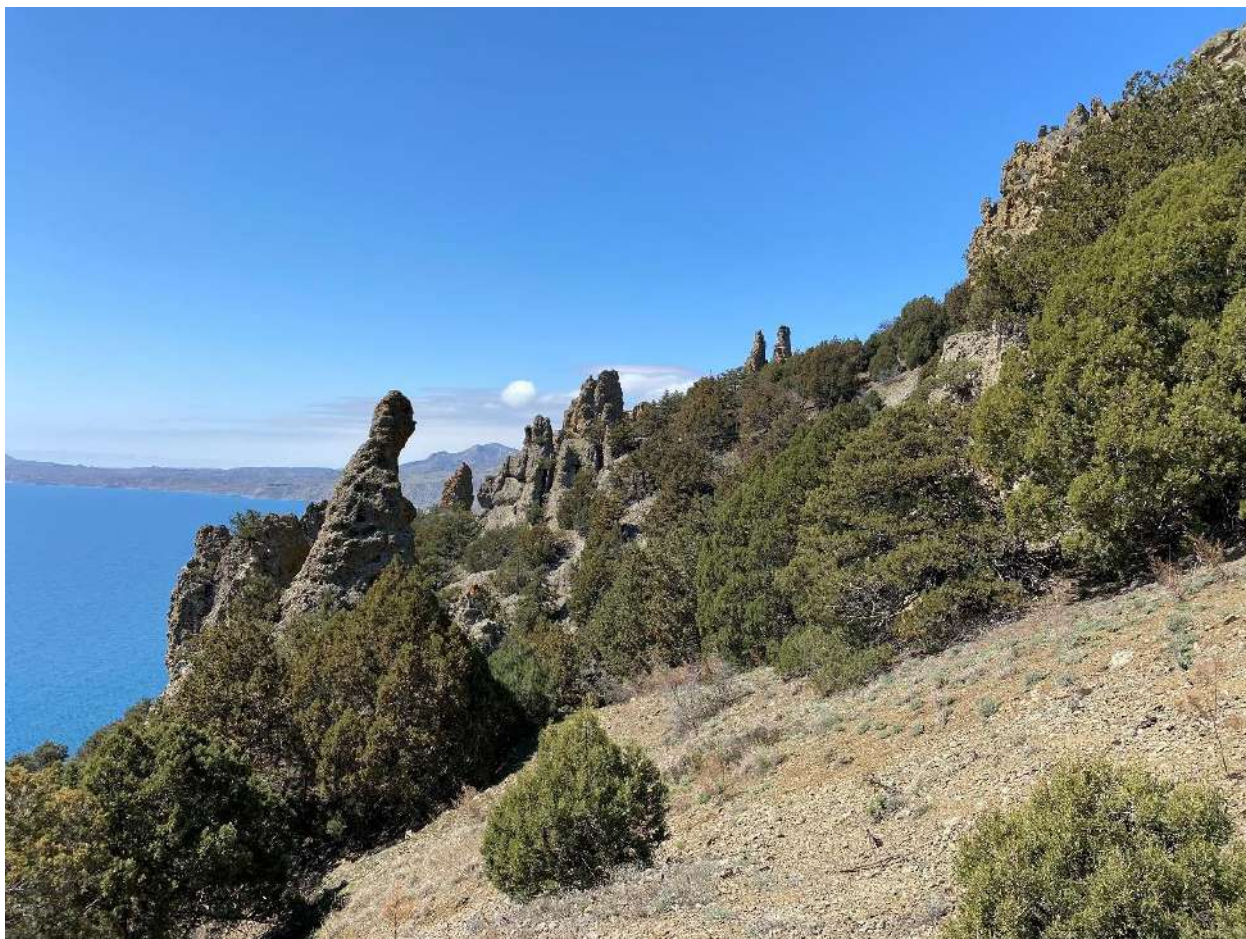


Рисунок 2.6 – Фация можжевельниковых лесов на южном склоне хребта Карагач

2.1.3. Приборная база и ее установка

Для обоих выбранных сообществ организованы площадки для измерения основных метеопараметров. Каждая площадка состоит из двух частей: открытый участок в зоне произрастания леса, обеспечивающий фиксацию значений характерных для данного ландшафта без влияния древесной растительности, и типичный для сообщества участок леса, в котором идет дублирование ряда измерений с целью определения условий функционирования ландшафта и влияния растительности на распределение потоков вещества и энергии.

Для получения всех основных метеопараметров с промежутком в один час на открытом участке КЛЭС была установлена метеостанция фирмы Davis Vantage Pro2 (рисунок 2.7). Основной блок датчиков установлен на высоте 2 м,

дополнительный датчик температуры и влажности воздуха на 0,5 м, анемометр – 7 м. Дополнительная станция на территории стационара позволила установить датчики температуры и влажности почвы на глубинах 0,05, 0,10, 0,15 и 0,20 м, а также датчики влажности листвы (рисунок 2.8). Датчики влажности листвы установлены на высоте травянистого покрова на открытом участке и под пологом деревьев, что позволило фиксировать степень и продолжительность увлажнения, выпадение росы и задержание осадков. Дополнительно проводились измерения температуры почвы с помощью даталоггеров серии TR на глубине 0,1 и 0,2 м, а также температуры и влажности воздуха на высоте 0,5 и 2 м над поверхностью в подкроновом пространстве.



Рисунок 2.7 – Метеостанция Davis Vantage Pro2 на территории КЛЭС



Рисунок 2.8 – Процесс установки датчиков температуры и влажности почвы (слева) и датчика влажности листвы по уровню травянистой растительности (справа)

Аналогично пушистодубовому лесу на южном слоне хребта Карагач в зоне произрастания можжевельнового леса установлена вторая метеостанция Davis Vantage Pro2, фиксирующая все основные метеорологические параметры (рисунок 2.9). В дополнение для измерения температуры почвы, температуры и влажности воздуха были установлены дата-логгеры серии TR в почве на глубине 0,1 м на открытом участке и под пологом леса, на высоте 0,5 и 2 м над поверхностью в подкроновом пространстве.

Детальное описание стационарных исследовательских площадок с последующим мониторингом предполагало использование БПЛА DJI P4 Multispectral, однако в связи со сложившейся небезопасной обстановкой проведение аэрофотосъемки на территории Крымского полуострова запрещено.



Рисунок 2.9 – Метеостанция Davis Vantage Pro2 на открытом участке в зоне произрастания можжевельного леса

Ограничение на использование БПЛА на территории Юго-Восточного Крыма установлено на основании Указа Главы Республики Крым после фактической даты начала реализации проекта РНФ. В частности, согласно Указа Главы Республики Крым от 24 февраля 2022 года No 32-У «Об угрозе чрезвычайной ситуации, возникшей на территории Республики Крым», в пункте 2-2 отмечается: «Ввести ограничения над всей территорией Республики Крым на полеты беспилотных воздушных судов, используемых физическими и юридическими лицами, за исключением беспилотных воздушных судов, используемых федеральными органами исполнительной власти, их территориальными органами, исполнительными органами Республики Крым». Таким образом это повлекло невозможность в полном объеме выполнить запланированные полеты. Предоставленные первичные

результаты были получены на основе проведенных ранее тестовых калибровочных полетов.

2.2. Подход к изучению низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов с использованием беспилотных летательных аппаратов

Экспедиционные и стационарные ландшафтные исследования традиционно проводятся в три этапа – подготовительный, полевой и заключительный (камеральный) [47]. Однако, там, где ландшафты занимают большие площади, использовать традиционные экспедиционные методы крайне проблематично. В большей мере это чрезвычайно актуально для горных регионов со сложным и расчлененным рельефом, покрытым труднопроходимой растительностью.

С момента зарождения ландшафтоведения как науки, в том числе при изучении морфологической структуры ландшафта и выполнении крупномасштабного ландшафтного картирования использовалась аэрофотосъемка с бортов самолетов. Этот вид деятельности существенно упрощал исследовательский процесс, но был довольно трудозатратным. Он использовался в основном на подготовительном этапе и сейчас съемка с бортов самолетов практически не используется. Это связано с усовершенствованием методик исследования, а также практически полной ликвидацией парка малых воздушных судов (самолетов), используемых для научных целей.

Г.П. Миллер [122] указывает, что полевая ландшафтная съемка горных и предгорных территорий выполняется прежде всего на ключевых участках, призванных стать эталонами морфологической структуры всей территории исследования. Это усложняет процесс выбора ключевого участка при работе с большими районами исследований и влияет на качество выполнения ландшафтной съемки.

С конца XX века в ландшафтоведении стали активно применять космические методы исследования. В.А. Николаев [136] предлагает

использовать космические методы для выделения ландшафтов и справедливо отмечает, что космические снимки подходят для среднемасштабных и крупномасштабных исследований. Несмотря на открытость источников спутниковых снимков и их относительно высокое пространственное разрешение, данный источник информации имеет ряд ограничений. В первую очередь это связано с орбитой и траекторией движения спутника, так как он проходит над определенной областью в конкретную дату, что диктует необходимость учитывать сезонность изучаемых параметров, не говоря о получении мгновенных данных. Так же ограничивающим фактором выступает облачность, из-за которой возникает необходимость выборки качественных снимков. Пик использования космических снимков пришелся на начало XXI века и продолжается по сегодняшний день. Однако, как уже отмечалось выше, они не могут решить ряд крупномасштабных задач, стоящих перед исследователями.

К концу 2010-х гг. наметилась тенденция на широкое применение БПЛА в научных исследованиях [259]. В первую очередь это связано с развитием технологий и широким внедрением БПЛА в производство. Во-вторых, с относительной ценовой доступностью. И в-третьих, с экономической эффективностью внедрения БПЛА. Ч.З. Нго с соавторами [134] указывают, что применение БПЛА позволяет с высокой точностью исследовать относительно большие площади за незначительный период времени. В тоже время, эти достоинства привели к тому, что БПЛА все чаще стали использовать в военной сфере [68] и для проведения различной противоправной деятельности [87]. В связи с этим во многих государствах мира проводится политика регулирования рынка и использования БПЛА [30, 38].

Использование БПЛА позволяет отслеживать суточную динамику изучаемых процессов, вести оперативный мониторинг и получать мгновенные данные в режиме онлайн. В научных исследованиях для создания качественной съемки территории с использованием БПЛА хорошо себя зарекомендовала продукция фирмы DJI [86, 108]. Используя БПЛА можно

добиться наиболее точных результатов по сравнению с другими методами дистанционного зондирования. Например, в [134] отмечается, что разрешение изображений БПЛА составляет 5 см/пиксель при съемке с высоты 200 м. Таким образом, съемка с БПЛА является более точной по сравнению с применением космических снимков высокого разрешения – Landsat (30 м/пиксель) и Sentinel-2 (10 м/пиксель) распространяемых по открытой лицензии. Безусловно, многие коммерческие продукты могут также похвастаться высоким пространственным разрешением менее 10 м/пиксель (Канопус-В, SPOT 6-7, WorldView-3, EROS B и пр.). Также, по сравнению со спутниковыми методами, помимо заявленного разрешения БПЛА, оператор устройства имеет возможность регулирования пространственного и спектрального разрешения за счет высоты работы прибора [307]. Преимущества использования БПЛА по сравнению с космическими аппаратами широко обсуждаются и практически реализовываются в различных регионах мира [277, 369, 374]. В тоже время, в отличие от космических снимков, с использованием БПЛА можно получать мультиспектральные изображения сверхвысокого пространственного разрешения.

На квадрокоптере DJI Phantom 4 Pro в зависимости от поставленных задач в исследованиях используются данные полученные с датчиков RGB (видимый спектр) и пяти монохромных датчиков (Синий (blue, B): 450 нм $\pm$ 16 нм, зеленый (green, G): 560 нм $\pm$ 16 нм, красный (red, R): 650 нм $\pm$ 16 нм, красный край (red edge, RE): 730 нм $\pm$ 16 нм, ближний инфракрасный (near-infrared, NIR)): 840 нм $\pm$ 26 нм для формирования мультиспектральных изображений.

Полученные в результате съемки БПЛА изображения обрабатываются с помощью программного обеспечения. Наиболее востребованными программными продуктами выступают – Agisoft Metashape и Pix4DMapper. Специализированные программы позволяют просмотреть отснятый материал, при необходимости отсеять часть данных и построить ряд картографических

изображений. В результате обработки создается ортофотоплан местности, 3D модель поверхности изучаемой территории и, при использовании мультиспектральной камеры, карты вегетационных индексов. Самым распространенным является NDVI, используемый в качестве показателя количества фотосинтетически активной биомассы. Помимо наиболее часто используемых вегетационных индексов также существуют и узконаправленные, рассчитанные на решение определенных задач. Для их использования программным обеспечением предусмотрен калькулятор индексов, в котором задается формула необходимого вегетационного индекса и строится соответствующее изображение.

При анализе полученного изображения также используется метод классификаций, который позволяет распределить отснятые объекты по заданным категориям. Наиболее часто этот метод используется при мониторинге изменений наземного покрова, в частности распространения лесов, оползней, пожаров. Рядом ученых проводились исследования точности классификаций мультиспектральных и RGB датчиков, результаты классификаций сравнивались с данными полевых исследований. Согласно этим исследованиям, RGB камера продемонстрировала точность около 90 %, а мультиспектральная – 95 % [255]. Отмечается, что ошибки классификации приходились в основном на затененные участки, а повышение точности достигается использованием расширенных алгоритмов анализа данных [307].

БПЛА активно применяются в научных исследованиях на заповедных территориях как на территории России, так и за рубежом. Тематике изучения структуры древостоя и его характеристик с помощью БПЛА посвящены работы Н.В. Ивановой с соавторами [79, 80], описывающие сосновые леса Приокско-Террасного биосферного заповедника, J.L. Gallardo-Salazar и М. Ротра-García [256] о сосновых лесах Мексики и других. А.В. Остроухов с соавторами [139] применяют БПЛА для целей ландшафтного картографирования труднодоступных территорий в государственном природном заповеднике «Болоньский». И.В. Чильчигешева [193] исследует с

применением БПЛА ландшафтные особенности островов Командорского архипелага. Широкое распространение применение БПЛА при изучении ландшафтов получило во Вьетнаме [108, 134]. Здесь БПЛА на постоянной основе используются для картографирования лесных ландшафтов. Ч.З. Нго с соавторами [134] использовали БПЛА для дешифрирования и картирования ландшафтов широколиственных и хвойных лесов заповедника Нгок Линь в провинции Кон Тум во Вьетнаме. И.П. Котлов с соавторами [108] использовали БПЛА для составления ландшафтной карты ключевого участка в национальном парке Бидуп-Нуй Ба.

Б.И. Кочуров с соавторами [110] применяют БПЛА для выделения древесной растительности при оценке зеленой инфраструктуры городских ландшафтов, а М.В. Покоева и А.М. Ярославцев [153] – для комплексного экологического мониторинга состояния древостоя. БПЛА также активно применяют для принятия управленческих решений и мониторинга за лесными пожарами [169, 218], сельскохозяйственными угодьями [256, 277, 314], оползневыми процессами [314] в исторических и археологических исследованиях [111, 218]. Помимо изучения ландшафтов и их элементов в ходе исследований уделяется большое внимание выбору типа камеры и способа обработки полученных первичных данных относительно каждой отдельной задачи [241, 255, 256, 307, 320].

При изучении радиационного и водного режима лесных ландшафтов огромное значение имеет влияние кронового рельефа на распределение потоков вещества и энергии. Рельеф, согласно определению, это совокупность всех неровностей земной поверхности, таким образом под кроновым рельефом подразумевается совокупность неровностей, формируемая листовыми пластинами на внешней границе кроны деревьев и кустарников. В свою очередь это является важнейшим аспектом при исследовании их структуры и функционирования. В лесу величина солнечной радиации, поступающей под полог леса, в большей степени определяется, морфометрическими характеристиками кронового рельефа, который сильно дифференцирует

значения солнечной радиации, поступающей на его поверхность (склоны кронового рельефа) и значения солнечной радиации, проходящей сквозь кроновое пространство, и в меньшей степени – характеристиками рельефа. Перераспределяясь в ландшафте, рассматриваемые потоки усложняют горизонтальную и вертикальную структуры ландшафта, создавая возможность или невозможность формирования большего количества ярусов и внутрифациальной структуры ландшафта [142]. При этом, именно рельеф крон деревьев (крутизна и экспозиция), определяет количество солнечной радиации, которое поступает на верхнюю поверхность крон (верхнюю границу лесного ландшафта), и, соответственно, распределяется далее по ее вертикальным составляющим. Без использования БПЛА невозможно получить модель рельефа кронового пространства, которое определяет величину поступающей солнечной радиации на поверхность крон и под полог и, соответственно, все процессы в подкорковом пространстве. В результате использование беспилотных летательных аппаратов представляет собой единственный способ полноценного описания процессов функционирования лесных ландшафтов.

Таким образом внедрение опыта и уже описанных методик использования БПЛА позволит добиться наиболее точных результатов при проведении исследований функционирования ландшафтов.

2.3. Методика расчета водного, радиационного и теплового балансов

2.3.1. Методика изучения радиационного баланса

С целью изучения радиационного баланса были выбраны площадки для измерения основных метеопараметров: открытый участок в зоне произрастания леса, где происходит фиксация значений без влияния растительного покрова, и типичный для сообщества участок леса, на котором идет дублирование ряда измерений, что позволит проследить влияние растительности на распределение потоков вещества и энергии.

Исследования проводились на основе данных метеостанций Davis Vantage Pro2. Многолетние значения метеопараметров для заданного участка получены с помощью базы данных реанализа MERRA [269, 332]. На их основе получено количество поступающей солнечной радиации и рассчитан радиационный баланс для сообщества в целом.

Измерения в лесных сообществах проводились в пределах типичных участков леса размерами 20x20 м по определенной регулярной сетке точек (рисунки 2.3, 2.5), расположенных через каждые 5 м. В каждой точке проводилось измерение пропускания солнечной радиации кронами деревьев с использованием цифрового измерителя освещенности DT-1309 на высоте 1 м над поверхностью почвы по методике В.О. Смирнова [170].

В каждой точке были получены значения высоты деревьев и подроста, сомкнутости крон и степени освещенности. Полученные значения сопоставлялись с величиной освещенности на открытом участке и по соотношению вычислялась величина поступающей суммарной солнечной радиации под кроны деревьев на земную поверхность. В итоге рассчитывалось процентное соотношение пропускания солнечной радиации кронами пушистодубового и можжевельного лесов. Для описания временной изменчивости данного параметра измерения проводились в 9:00, 12:00, 15:00 и 17:00 часов в ясную безветренную погоду. Для более полного описания состояния крон деревьев и особенностей задержания ими поступающей радиации, измерения проводились в летний период максимальной вегетации, при ясной безветренной погоде.

Для изучения температурного и влажностного режимов под пологом леса были установлены дата-логгеры серии TR, регистрирующие с периодичностью 1 раз в час температуру и влажность воздуха на высоте 0,5 м и 2 м над поверхностью почвы. Полученные данные позволили рассчитать величину эффективного излучения поверхности почвы – опада в пределах пушистодубового и можжевельного лесов.

Высота кронового рельефа получена с использованием квадрокоптера DJI P4 Multispectral (рисунок 2.10).



Рисунок 2.10 – Организация тестового полета с использованием квадрокоптера DJI P4 Multispectral на открытом участке около можжевельного леса

Отснятый материал обрабатывался с помощью программного обеспечения Pix4D, в котором создавался ортофотоплан, содержащий информацию о значениях высот кронового рельефа. Поверхность крон является достаточно неоднородной и сложной, поэтому предварительно была построена ее цифровая модель, которая позволила рассчитать крутизну и экспозицию склонов кронового рельефа в пушистодубовом и можжевельном лесу, а также построить модель поступления суммарной солнечной радиации на поверхность крон при безоблачном небе. На основе данных рельефа кроны и географических координат района исследований моделируется распределение приходящей солнечной радиации с учетом положения и угла наклона Солнца относительно поверхности и особенностей рельефа с помощью стандартного набора инструментов ArcGIS 10.

Расчет радиационного баланса (B) осуществлялся по формуле М.И. Будыко [29]:

$$B = (Q - R) - Ee, \quad (2.1)$$

где Q – суммарная солнечная радиация;

R – отраженная солнечная радиация;

Ee – эффективное излучение.

Отраженная радиация рассчитывалась по формуле:

$$R = A \cdot Q, \quad (2.2)$$

где A – альбедо земной поверхности.

Альбедо определялось по данным, приведенным в работе В.В. Рахманова [160]. Разность между суммарной и отраженной радиацией дает величину поглощенной коротковолновой радиации, или коротковолнового радиационного баланса.

Вычисления элементов длинноволновой части радиационного баланса проводились на основе данных, полученных с помощью дата-логгеров. Расчеты проводились на основе формулы D. Brunt [220].

Использовались значения, взятые за период измерений степени пропускания солнечной радиации кронами. Так как измерение температуры и влажности проводились в одной типовой точке, то величины элементов длинноволновой части радиационного баланса рассчитаны как средние значения для участков пушистодубового и можжевельного лесов.

Эффективное излучение земной поверхности определялось по формуле:

$$Ee = Es - \delta Ea, \quad (2.3)$$

где Es – поток теплового излучения подстилающей поверхности, направленный в сторону атмосферы;

Ea – противоизлучение атмосферы;

δ – относительная излучательная способность поверхности.

Поток теплового излучения подстилающей поверхности, направленный в сторону атмосферы, определялся по формуле:

$$E_s = \delta \sigma T^4, \quad (2.4)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана;

T – температура воздуха.

Противоизлучение атмосферы определялось по формуле D. Brunt [220]:

$$E_a = \delta \sigma T^4 ((1-a) + b\sqrt{e}), \quad (2.5)$$

где a и b – эмпирические константы согласно М. Е. Берлянд ($a = 0,39$; $b = 0,058$) [15];

e – парциальное давление водяного пара.

2.3.2. Методика изучения теплового баланса

Как и при изучении радиационного баланса, для изучения теплового баланса измерения и расчеты проводились для двух участков – открытого и лесного.

Измерение основных метеорологических параметров проводилось с помощью мониторинговой метеостанции Davis Vantage Pro2, установленной на открытом участке, фиксация значений проводилась ежечасно. На их основе получено количество поступающей солнечной радиации и рассчитаны основные элементы теплового баланса для сообщества в целом. Для проведения измерений под пологом леса были установлены дата-логгеры серии TR, регистрирующие температуру и влажность воздуха на высоте 0,5 м и 2 м над поверхностью почвы, а также под поверхностью на глубине 10 и 20 см. Таким образом для корректного использования методики вычисления

составляющих теплового баланса и сравнимости результатов на открытом участке и в лесу датчики измерения были установлены на тех же уровнях.

Для описания состояния крон деревьев и особенностей задержания ими поступающей радиации, наши измерения проводились в зимний период (отсутствие листвы), весенний период (начало вегетации) и поздней весной (максимальное развитие кроны) при ясной безветренной погоде.

По заданной сетке измерений проводились измерения сомкнутости крон и степени пропускания солнечной радиации под кроны деревьев на земную поверхность. Затем полученные значения усреднялись для удобства проведения расчетов и описания сообщества в целом.

В основе представления об уравнении теплового баланса лежит закон сохранения энергии, применяемый для вертикальной колонны, захватывающей всю внешнюю географическую оболочку. Уравнение теплового баланса земной поверхности является суммой всех потоков тепла между поверхностью и окружающим пространством. Таким образом уравнение приобретает вид:

$$R = LE + P + B, \quad (2.6)$$

где R – радиационный баланс;

LE – затраты тепла на испарение (L – скрытая теплота испарения, E – скорость испарения или конденсации);

P – турбулентный поток тепла;

B – поток тепла в почве.

При этом величина R считается положительной, если она характеризует приход тепла к подстилающей поверхности, а все остальные величины — положительными, если они характеризуют расход тепла.

Методика расчета радиационного баланса (R) сформулирована М.И. Будыко [29].

Для получения значения испарения в лесу использовалась формула [29]:

$$E = \frac{R-B}{L+Cp \frac{Q_1-Q_2}{q_1-q_2}}, \quad (2.7)$$

где E – испарение;

R – радиационный баланс;

B – поток тепла в почве;

L – скрытая теплота испарения;

C_p – теплоемкость воздуха при постоянном давлении (Физические свойства воздуха..., 2023);

$Q_1 - Q_2$ – разность температур на двух высотах;

$q_1 - q_2$ – разность удельных влажностей на двух высотах.

Расчет потока тепла в почве основан на использовании данных об изменении температуры почвы с глубиной и во времени при известных теплофизических характеристиках.

$$B = \frac{C_v}{\tau} S_1, \quad (2.8)$$

где C_v – объемная теплоемкость;

τ – продолжительность интервала (в минутах), для которого находится средний поток q_1 ;

S_1 – величина, характеризующая изменение температуры в верхнем 20-см слое почвы за интервал τ .

Величина S_1 вычисляется по формуле:

$$S_1 = S_0 + S_5 + S_{10} + S_{15} + S_{20}, \quad (2.9)$$

где $S_0 = 20 \cdot 0,082 \Delta t_0$;

$S_5 = 20 \cdot 0,333 \Delta t_5$;

$S_{10} = 20 \cdot 0,175 \Delta t_{10}$;

$S_{15} = 20 \cdot 0,156 \Delta t_{15}$;

$$S_{20} = 20 \cdot 0,004 \Delta t_{20}.$$

Величины Δt_0 , Δt_5 , Δt_{10} , Δt_{15} и Δt_{20} представляют собой разности между соответствующими значениями температуры почвы в последующий и предыдущий сроки наблюдений;

Δt_0 – аналогичная разность между температурой поверхности почвы в последующий и предыдущий период;

Δt_5 – такая же разность температур на глубине 5 см и т.д.

Расчет объемной теплоемкости проводится методом С.В. Макарычева [119]:

$$C_{V0} = \frac{C_{\text{ж}} U_{\text{пв}} (p_0 - 0.76 p_{\text{ж}}) p_0}{0.76 p_{\text{ж}}}, \quad (2.10)$$

где $C_{\text{ж}} = 4190$ Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость воды;

$\rho_{\text{ж}} = 1000$ кг/м³ – плотность воды;

ρ_0 – плотность абсолютно сухой почвы;

$U_{\text{пв}}$ – полная влагоемкость почвы.

$$U_{\text{пв}} = \frac{\Pi}{\rho}, \quad (2.11)$$

где Π – порозность почвы;

ρ – плотность почвы, г/см³.

$$\Pi = \frac{d - \rho}{d}, \quad (2.12)$$

где d – плотность твердой фазы почвы, г/см³.

Объемная теплоемкость в срок наблюдений определяется из формулы:

$$C_V = C_{V0} + C_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} U, \quad (2.13)$$

где C_{V0} – объемная теплоемкость сухой почвы (Способ определения удельной..., 2003);

$C_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} U$ – теплоемкость содержащейся в почве жидкости;

U – влажность почвы.

Вычисление турбулентного потока тепла является сложной задачей, поэтому чаще всего в климатологических расчетах турбулентного теплообмена для условий суши его величины определяются из решения уравнения теплового баланса. Наиболее простой путь при этом заключается в определении теплообмена как остаточного члена баланса, т. е. по формуле:

$$P = R - LE - B. \quad (2.14)$$

2.3.3. Методика изучения водного баланса

В классическом виде, уравнение водного баланса [130] может быть представлено в следующем виде (рисунок 2.11):

$$x + y_1 + w_1 + z_1 = y_2 + w_2 + z_2 \pm \Delta u \quad (2.15)$$

где x – атмосферные осадки на поверхность объекта;

y_1 – поверхностный приток воды извне;

w_1 – подземный приток воды извне;

z_1 – конденсация водяного пара;

y_2 – поверхностный отток воды за пределы объекта;

w_2 – подземный отток воды за пределы объекта;

z_2 – испарение;

Δu – изменение объема воды в пределах объекта (контура).

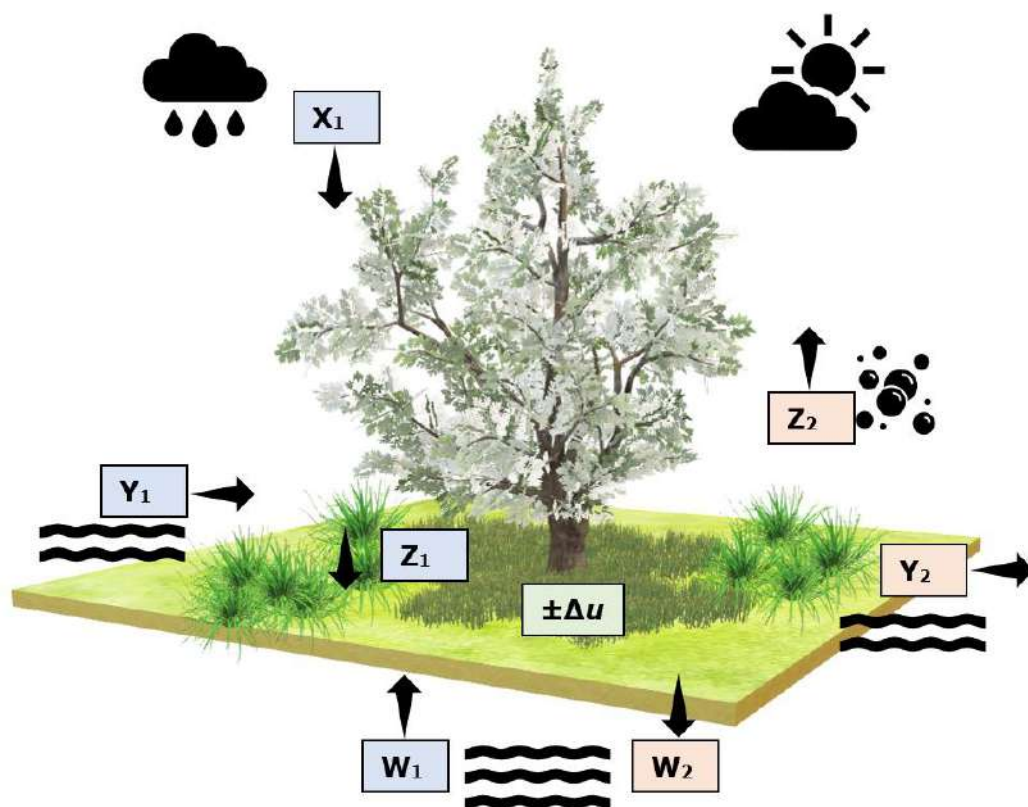


Рисунок 2.11 – Схема компонентов водного баланса

На локальном уровне структура водного баланса представляет собой еще более сложное явление. Структура водного баланса лесов состоит из нескольких элементов: поступление воды с атмосферными осадками и поверхностным стоком с соседних участков, задержание воды кронами деревьев, сток воды по веткам и стволу деревьев, транспирация и испарение с кроны деревьев, поступление воды на поверхность лесного опада, испарение с поверхности лесного опада, поступление воды в почву, испарение воды из почвы, ее задержание опадом (формирование влагоемкости почвы и опада), поверхностный сток, внутрипочвенный сток, переход воды в подземный сток.

Многолетние данные о количестве и интенсивности атмосферных осадков, влагозапасах в почве, поверхностном стоке на территории КЛЭС были получены из Летописей природы Карадагского заповедника.

Для получения значений и построения карт эвапотранспирации были использованы данные открытой базы данных реанализа ERA5 проекта Copernicus Climate Change Service, реализуемого Европейским центром

среднесрочных погодных прогнозов (ECMWF) [332]. В результате были получены усредненные месячные данные за 1978–2021 гг. Они представлены в формате NetCDF4 и покрывают рассматриваемую территорию регулярной сеткой с размером ячейки $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$.

Помимо использования данных реанализа проводились стационарные и полустационарные исследования. На выбранных ключевых участках пушистодубового и можжевельного лесов, с помощью установленной метеостанций, были получены данные о ежечасном количестве осадков, их интенсивности, а также расчетное значение эвапотранспирации. Данный показатель рассчитывается самой метеостанцией на основе температуры воздуха, влажности, средней скорости ветра и солнечного излучения, но не происходит учет конденсации. Кроме того, в зоне пушистодубового установлен комплекс дополнительных датчиков влажности почвы на разных глубинах и датчики влажности листвы.

Датчики влажности почвы измеряют электрическую проводимость, и в результате уровень влажности фиксируется в сантибарах. Затем значения переводились в проценты, однако после определенного порога низкая влажность почвы интерпретируется как «0». С точки зрения растительности данное значение обозначает отсутствие доступной для впитывания влаги.

Датчик влажности листвы представляет собой имитацию листовой пластины, на которой конденсируется влага. В зависимости от степени покрытия поверхности листа влагой получаемые значения варьируются от 0 – абсолютно сухая поверхность, до 15 – максимальное увлажнение.

В условиях можжевельного леса измерения влажности почвы проводились ежемесячно весовым методом.

2.4. Методика оценки факторной энтропии ландшафтов

В настоящее время в рамках системной парадигмы любой объект можно представить, как набор элементов, объединённых энергоинформационными связями. Их анализ позволяет выявить свойства, характеризующие

функционирование системы во времени и пространстве. Одним из них является энтропия, в классическом определении характеризующая меру необратимого рассеивания энергии.

Понятие «энтропия» фигурирует в научном обществе ещё с XIX века и к настоящему времени сменило ряд различных трактовок и областей применения. Ознакомившись со множеством вариантов интерпретации этого явления, можно обозначить его как меру необратимого рассеивания энергии (классическое определение), меру отклонения от равновесия, меру хаотичности, меру вероятности. В экологии это понятие часто используется как синоним меры биологического разнообразия. Так же понятие «энтропия» можно использовать и для описания ландшафта.

Для лучшего понимания смысла и причины возникновения этого понятия, необходимо обратиться к истокам его формирования. По мере развития представления об энтропии, видоизменялось и определение данного термина. Первоначально понятие «энтропия» зародилось в физике, затем распространилось в химию, биологию, географию, теорию информации и даже космологию.

Клод Шеннон представил энтропию как меру случайности [197]. В его определении *«это количество информации, приходящейся на одно элементарное сообщение источника, вырабатывающего статистически независимые сообщения»*. В этой сфере энтропия показывает, что количество равновероятных состояний системы обуславливает количество информации, необходимое для снятия неопределённости о ней.

Согласно Концепции, принятой в г. Рио-де-Жанейро, биологическое разнообразие означает *«вариабельность живых организмов из всех источников, включая, среди прочего, наземные, морские и иные водные экосистемы, и экологические комплексы, частью которых они являются; это понятие включает в себя разнообразие в рамках вида, между видами и разнообразие экосистем»* [98]. В современной биологии понятие «энтропия»

используется для оценки видового разнообразия, устойчивости, старения (накопления энтропии) и т. д.

В настоящее время формула Шеннона наиболее часто применяется для оценки ландшафтного разнообразия. В работе О.Н. Барышниковой «Информационные свойства ландшафтных геосистем и возможности их исследования» [11] энтропия отождествляется с информационной составляющей ландшафта, а главное информационное воздействие на геосистемы оказывает земная гравитация. Отмечено, что эта сила обуславливает формирование рисунка ландшафта, вертикальную стратификацию, метрические свойства земных тел и, таким образом, определяет разнообразие природной среды. О.Н. Барышникова с соавторами [12] дают количественную оценку разнообразия ландшафта посредством вычисления энтропии и отмечают, что максимальные показатели приходятся на переходные зоны (экотоны) и контакты геологических структур. При удалении от данных зон происходит снижение энтропии. Кроме того, в работе отмечается тенденция к снижению энтропии геосистем по мере продвижения сверху вниз до определённого иерархического уровня. В качестве факторов, определяющих величину ландшафтного разнообразия, представлены: климат, размер массива, особенности рельефа и геологии, характер растительности, гидроморфизм территории. Поступление и трансформация солнечной энергии обуславливает ландшафтное разнообразие на планетарном уровне. Таким образом увеличение энтропии – показатель эволюции и развития любой системы.

Разнообразие значений факторов вычислялось посредством применения формулы Шеннона:

$$E(A) = - \sum \frac{f_i}{\sum f_i} \log_2 \frac{f_i}{\sum f_i}, \quad (2.16)$$

где f_i – количество точек заданного класса значений;

$\sum f_i$ – количество точек в контуре.

С целью приведения значений энтропии к относительным величинам была рассчитана относительная энтропия:

$$E = E(A)/n, \quad (2.17)$$

где n – количество выбранных классов.

2.5. Методика изучения ландшафтных стратегий в условиях климатических изменений

Изменение растительного покрова является одним из ведущих показателей реакции ландшафта на изменение факторов и условий внешней среды [333, 416]. В последние годы, изменение растительности на планете носит глобальный характер [326, 363] и представляет существенную угрозу. В решении вопроса о резком сокращении растительного покрова заинтересованы все страны, что находит отражение в различных нормативных документах во всех странах мира [219, 350].

Огромное влияние на изменение растительного покрова оказывают климатические факторы [293, 296, 313, 404], а также антропогенное воздействие, связанное как с комплексными процессами, так и с целенаправленным сведением растительного покрова для различных хозяйственных целей [242, 249, 407]. Особенно остро проблема вырубки растительности стоит в крупных государствах обладающих запасами древесины – Бразилии, Канаде, Китае, России и др. Изменение растительности оценивается различными способами – с применением компьютерного моделирования, с использованием методов дистанционного зондирования [271, 395, 414], через изменение соотношения типов наземного покрова [200, 315, 364], изменение характеристик вегетационных индексов [257, 298, 408], при применении различных классификаций мультиспектральных космических снимков [290, 303].

В тоже время использование данных дистанционного зондирования позволяет практически в режиме реального времени изучать изменение растительного покрова, в том числе и его качественные характеристики. В последние годы для оценки изменения растительности все чаще применяется анализ динамики значений вегетационного индекса NDVI [257, 310, 319]. Это объясняется в первую очередь простотой расчета NDVI и большим накопленным объемом мультиспектральных космических снимков высокого разрешения, которые необходимы для расчета NDVI. Среди наборов космических снимков можно отметить MODIS, Landsat, Sentinel и ряд других, которые имеют как достоинства, так и недостатки, однако активно применяются при изучении растительного покрова в различных регионах мира. Традиционно, использование вегетационного индекса NDVI находит применение в сельском хозяйстве [240] для анализа состояния посевов и расчета норм проведения различных мелиорационных работ. Использование вегетационного индекса NDVI в последние годы активно применяется для оценки изменения растительности в Китае [267, 291, 310, 400], Индии [297, 381], США [294], Бангладеш [200], Аргентине [319], Иране [261], Пакистане [408] и других странах.

2.5.1. Данные

2.5.1.1. Растительность Юго-Восточного Крыма

В качестве исходных данных о растительном покрове в пределах Юго-Восточного Крыма использована карта (рисунок 2.12), представленная в работе [344].

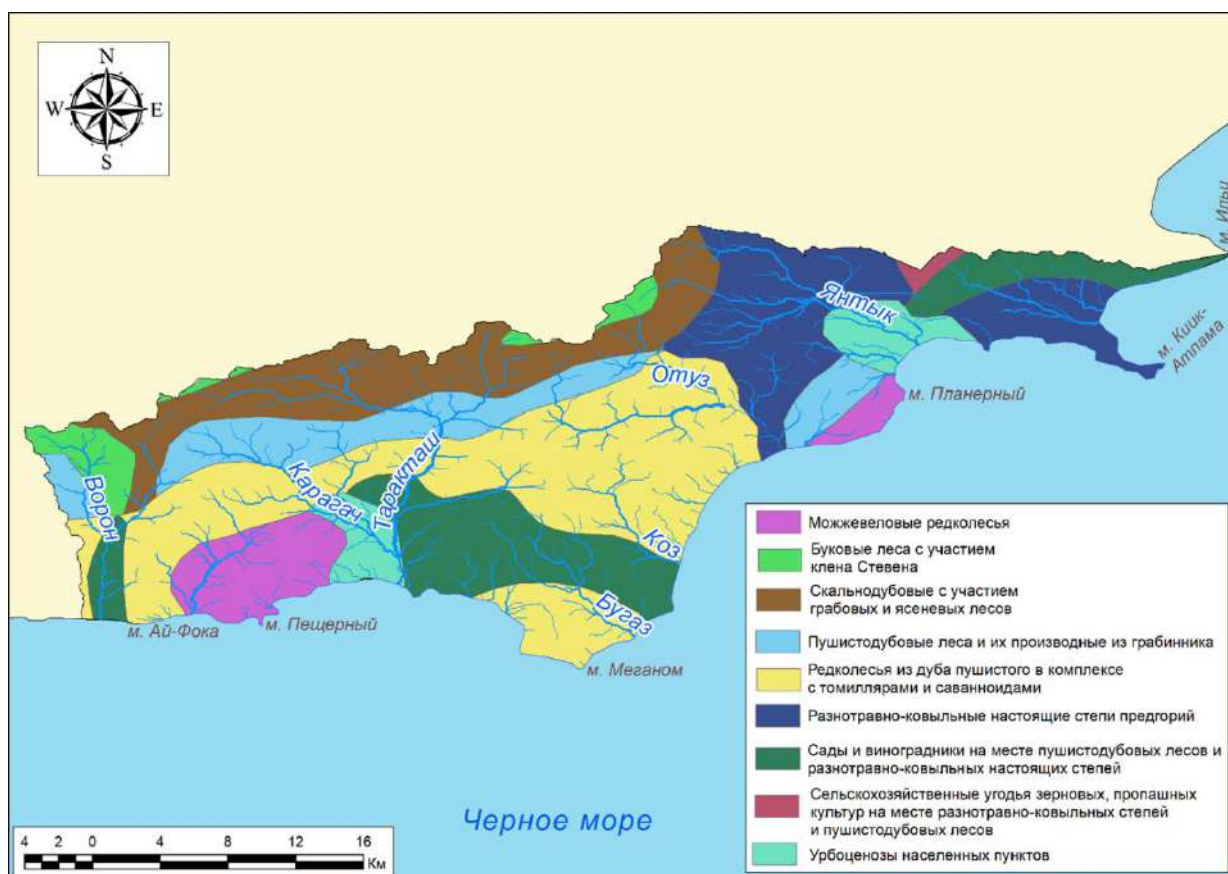


Рисунок 2.12 – Растительность Юго-Восточного Крыма (по [344])

В исследуемом регионе пространственное распределение растительности подвержено влиянию высотной поясности, которая не представляет собой цельные полосы и нарушается рядом местных локальных орографических факторов. С уменьшением абсолютных высот с севера на юг последовательно сменяются – буковые леса с примесью клена Стевена, скальnodубовые леса с примесью грабовых и ясеневых лесов, пушистодубовые леса, редколесья из дуба пушистого в комплексе с томилярами и саванноидами, разнотравно-ковыльные настоящие степи. В наиболее равнинных участках и нижней части, примыкающей к морю, в Юго-Восточном Крыму расположены сельскохозяйственные земли, занятые садами, виноградниками и возделываемыми полями. Вдоль побережья встречаются можжевеловые леса. Повсеместно представлены урбоценозы населенных пунктов. Распределение площадей основных типов

растительности в пределах Юго-Восточного Крыма представлено в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные типы растительного покрова в Юго-Восточном Крыму

Типы растительного покрова	Площадь, кв. км
Можжевеловые редколесья	38.42
Буковые леса с участием клена Стевена	18.11
Скальнодубовые с участием грабовых и ясеневых лесов	80.54
Пушистодубовые леса и их производные из грабинника	61.28
Редколесья из дуба пушистого в комплексе с томилярами и саванноидами	169.03
Разнотравно-ковыльные настоящие степи предгорий	85.39
Сады и виноградники на месте пушистодубовых лесов и разнотравно-ковыльных настоящих степей	84.31
Сельскохозяйственные угодья зерновых, пропашных культур на месте разнотравно-ковыльных степей и пушистодубовых лесов	2.58

2.5.1.2. Космические снимки

В работе использованы космические снимки MODIS за 2001–2022 гг. Использование изображений MODIS (с разрешением 500 метров/пиксель, составленных из 8-дневных композитов) в первую очередь обусловлено их более широким временным охватом, включая получение облачных и малооблачных снимков в районе исследования по сравнению с конкурентами, такими как Landsat (с разрешением 30 метров/пиксель) и Sentinel-2 (с разрешением 10 метров/пиксель), которые могут предоставлять более высокое пространственное разрешение. MODIS имеет более высокую периодичность наблюдения за территорией и акваторией в районе исследования. Обработка и вычисления значений вегетационного индекса NDVI по космическим снимкам MODIS производились с использованием платформы облачных вычислений Google Earth Engine (GEE).

2.5.1.3. Температура, осадки и радиация

В последние годы активно анализируются различные базы данных о метеорологических параметрах [206, 211].

Данные о пространственном и временном распределении полей температуры воздуха, количества выпадающих осадков и солнечной радиации получены из открытых баз данных и опубликованных работ авторов [248, 263]. Данные о температуре воздуха в пределах территории Юго-Восточного Крыма получены из базы данных ClimateEU [323]. Данные о количестве выпадающих осадков и солнечной радиации получены с использованием платформы облачных вычислений GEE – с наборов данных CHIRPS [254] и ERA5-Land [343].

2.5.2. Методика исследования

2.5.2.1. Анализ изменения трендов NDVI

Изменение трендов значений NDVI в пределах Юго-Восточного Крыма анализируется для всей исследуемой территории и для каждой ячейки раstra значений NDVI. Для оценки изменения трендов активно применяется модель линейной регрессии [267, 291, 292, 394]. Оценка изменений значений NDVI со временем производится по формуле

$$Slope = \frac{n * NDVI_i * \sum_{i=1}^n i - \sum_{i=1}^n i * \sum_{i=1}^n i}{n * \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}, \quad (2.18)$$

где i – год;

n – количество лет наблюдения за изучаемым явлением;

$NDVI_i$ – значение NDVI за i год.

Отрицательные значения наклона NDVI указывают на то, что со временем значения NDVI уменьшаются, а положительные значения наклона NDVI – на то, что со временем значения NDVI увеличиваются. Дополнительно, в программном комплексе R Studio проводилась оценка р-уровней значимости.

2.5.2.2. Коэффициент вариации

Для оценки стабильности изменения значений NDVI за период с 2001 по 2022 гг. в Юго-Восточном Крыму был рассчитан коэффициент вариации. Расчет коэффициента вариации производился по формуле:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (NDVI_i - NDVI)^2}}{NDVI}, \quad (3.19)$$

где CV – коэффициент вариации;

n – количество лет в исследуемом периоде;

$NDVI_i$ – значение NDVI в год i ;

$NDVI$ – среднее значение NDVI за изучаемый период [291].

Оценка коэффициента вариации проводилась с использованием программного комплекса R Studio для каждого пикселя растра в пределах исследуемого региона. Данные о значениях из растра получены с использованием программного комплекса Quantum GIS. В качестве меры стабильности изменений значения коэффициента вариации разделены на четыре класса, согласно [267] – очень стабильный ($CV \leq 0,04$), стабильный ($0,04 < CV \leq 0,08$), незначительно измененный ($0,08 < CV \leq 0,12$) и сильно измененный ($CV > 0,12$) для каждого пикселя изучаемого изображения.

2.5.2.3. Индекс Херста

Для оценки стратегий развития лесных ландшафтов, был рассчитан индекс Херста, который дает возможность прогнозирования тенденции эволюции изменения временных рядов, и это эффективный метод выявления долгосрочной зависимости временных рядов. Подробное описание использование и расчетов индекса Херста показаны во многих работах [267, 291, 298]. Для упрощения расчетов, оценка индекса Херста проводилась с использованием программного комплекса R Studio для каждого пикселя растра в пределах исследуемого региона. Значения данных были получены из

растра с использованием программного пакета Quantum GIS. Для расчета индекса Херста использовались данные из 8-дневных периодов измерений космического спутника MODIS. Расчет индекса Херста проводился с использованием среды программирования R Studio и библиотеки "pracma". Этот метод включает в себя вычисление индекса Херста с помощью анализа R/S.

Для выполнения анализа R/S временные ряды, охватывающие период с 2001 по 2022 год, были индивидуально подвергнуты обширному исследованию на предмет стационарности или нестационарности. Эта оценка проводилась для каждой пространственной ячейки. Для этой цели использовался тест Дики-Фуллера, доступный в среде R Studio и с помощью библиотеки "tseries". В случаях, когда были обнаружены нестационарные временные ряды, применялась последовательность преобразований, чтобы сделать их стационарными. Программа R Studio использовалась для этого процесса, с применением таких методов, как логарифмирование и дифференцирование. После достижения стационарных временных рядов производился расчет индекса Херста с использованием библиотеки "pracma" в среде R Studio. Этот индекс вычисляется на основе анализа R/S и служит показателем долгосрочной зависимости или устойчивости в данных. Рассчитанные значения индекса Херста предоставляют информацию об основной временной динамике анализируемых переменных в различных пространственных ячейках. Следует отметить, что этот методологический подход соответствует комплексному рабочему процессу, включающему предварительную обработку данных, статистический анализ и вычислительные процедуры, все проводимые в среде R Studio. Значение индекса Херста играет важную роль в определении будущей тенденции NDVI.

2.5.2.4. Корреляционный анализ

Для оценки воздействия климатических факторов (среднегодового количества выпадающих осадков, среднегодовых температур воздуха и

среднегодового количества поступления солнечной радиации) был проведен корреляционный анализ между климатическими факторами и среднегодовыми значениями NDVI в пределах Юго-Восточного Крыма. Корреляционный анализ активно применяется при исследовании взаимосвязей между климатическими факторами и значением NDVI в различных исследуемых регионах мира [246, 291, 406]. Оценка корреляции проводилась с использованием программного комплекса R Studio. Данные о среднегодовых значениях NDVI, температуры воздуха, количества выпадающих осадков и поступлении солнечной радиации были получены для сетки точек с использованием программного комплекса Quantum GIS (набор инструментов Vector-Raster SAGA). Каждая точка в представленной сетке точек служит центральной точкой для квадрата, размером 500 на 500 метров. Следовательно, эти точки равномерно разделены друг от друга на расстояние 500 метров. Расчет корреляции произведен по формуле:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.20)$$

где R_{xy} – коэффициент корреляции;

n – количество лет в исследуемом периоде;

x и y – факторы, используемые для корреляционного анализа, соответственно, представляющие выборочные средние значений переменных (Sun et al., 2019).

Проведение корреляционного анализа было выполнено с использованием программного пакета R Studio. Для целей анализа корреляции временные ряды данных NDVI и климатические данные, охватывающие период с 2001 по 2022 год, были тщательно проанализированы с точки зрения их стационарности или нестационарности. Это исследование проводилось при помощи статистического теста Дики-Фуллера в среде программирования R Studio с использованием библиотеки "tseries". Временные ряды, выявившие

нестационарность, подверглись процессу преобразования в стационарные ряды с использованием методов логарифмирования и дифференцирования. Эти методы были применены с целью выравнивания дисперсии во временной плоскости и удаления трендов. После получения стационарных временных рядов были вычислены коэффициенты корреляции для каждой временной точки данных. Этот шаг имеет важное значение для выявления связей между NDVI и климатическими переменными. Затем, сгенерированные наборы данных о корреляции были внедрены в программный пакет ArcGIS. В этой геопространственной среде была выполнена процедура интерполяции, используя широко известный метод "Spline". Эта операция интерполяции позволила получить промежуточные значения между дискретными точками данных. Далее были созданы картографические представления для визуализации пространственных закономерностей, выявленных на основе интерполированных данных, что дало ценные представления о динамике изучаемых переменных в пределах географической области.

2.6. Построение вегетационных моделей по сценариям изменения климата

2.6.1. Сценарии изменения климата

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (IPCC) с целью оценки физических научных основ изменения климата в рамках научной группы проводит исследования и публикует доклады (отчеты), которые содержат в себе анализ наблюдений, моделей, палеоклиматической информации и понимания физических, химических и биологических процессов и компонентов климатической системы.

Отчет продвигает передовой опыт в области прослеживаемости и воспроизводимости научных данных и предоставляет гибкий пространственный и временной анализ прошлой, наблюдаемой и прогнозируемой информации об изменении климата.

Общие социально-экономические пути (SSP) — это сценарии изменения климата прогнозируемых социально-экономических глобальных изменений

до 2100 года, как это определено в Шестом оценочном докладе МГЭИК об изменении климата в 2021 году [284]. Они используются для разработки сценариев выбросов парниковых газов с различными климатическими последствиями (рисунок 2.13). SSP предоставляют повествования, описывающие альтернативные социально-экономические события. Таким образом сформированы пять сценариев: SSP1: Устойчивое развитие («На зеленом пути») SSP2: «Середина дороги» SSP3: Региональное соперничество («Каменистая дорога») SSP4: Неравенство («Разделенная дорога») SSP5: Развитие на ископаемом топливе («На шоссе»).

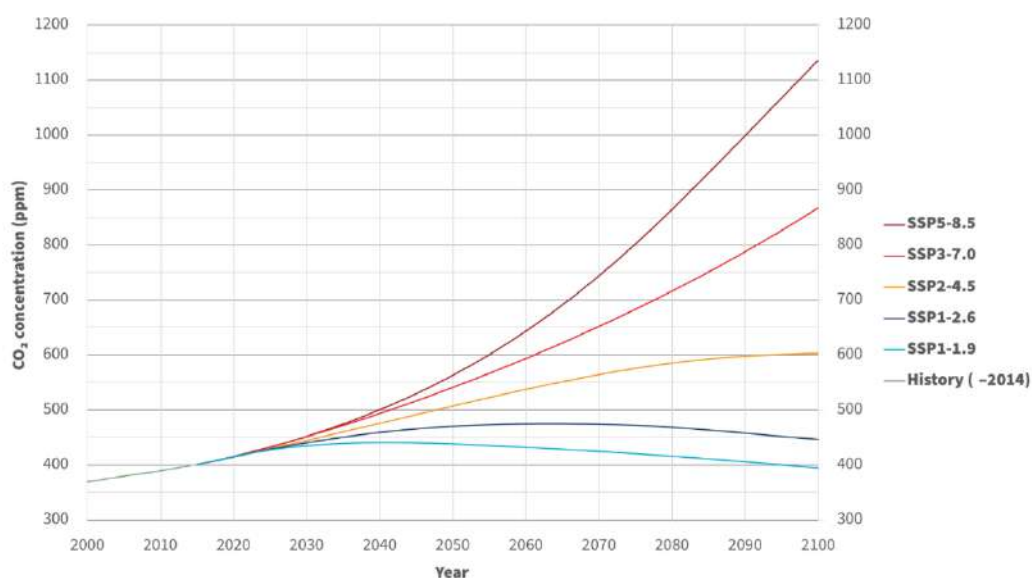


Рисунок 2.13 – Прогнозируемые концентрации CO₂ в атмосфере для различных общих социально-экономических путей (SSP) в XXI веке (по прогнозам MAGICC7, простой/упрощенной климатической модели). Каждая точка данных представляет собой среднее значение смоделированных значений, полученных на основе пяти моделей комплексной оценки [284].

Значения будущих выбросов и концентраций парниковых газов, аэрозолей, озоноразрушающих веществ прогнозируются на предположениях о том, как социально-экономические системы могут развиваться в течение 21-го века. Ключевым источником информации для которых являются сценарии, но при этом учитываются и другие факторы. Выбросы из естественных источников, таких как океан и биосфера суши, обычно считаются

постоянными или развиваются в ответ на антропогенное воздействие или прогнозируемое изменение климата. Естественные воздействия, такие как прогнозируемые изменения солнечной радиации и долгосрочное среднее фоновое воздействие вулканов, отдельные вулканические извержения не учитываются.

Основой для оценок Рабочей группы используются температуры поверхности относительно 1850–1900 годов в качестве базовой линии (самый ранний период надежных наблюдений с достаточным географическим охватом). От данных значений отталкиваются конкретные уровни глобального потепления, такие как 1,5°C, 2°C, 3°C или 4°C, они определяются для оценки и передачи информации о глобальных и региональных изменениях, связывая их со сценариями.

При сценарных расчетах используются кумулятивные выбросы углекислого газа (CO₂): общее чистое количество CO₂, выбрасываемое в атмосферу в результате деятельности человека. Учитывая почти линейную зависимость между совокупными выбросами CO₂ и повышением глобальной температуры поверхности, совокупные выбросы CO₂ важны для понимания того, как прошлые и будущие выбросы CO₂ влияют на глобальную температуру поверхности.

В Шестом оценочном докладе МГЭИК дана оценка прогнозируемых температурных последствий набора из пяти сценариев, основанных на рамках ГосПБП [284]. Названия этих сценариев состоят из SSP, на котором они основаны (SSP1-SSP5), в сочетании с ожидаемым уровнем радиационного воздействия в 2100 году (от 1,9 до 8,5 Вт/м²) (таблица 2.2). В результате имена сценариев SSPx-y.z перечислены ниже.

Несмотря на отсутствие оценки вероятностей представленных сценариев, их авторы описывают в комментариях SSP5–8.5 как крайне маловероятный, SSP3–7.0 как маловероятный, а SSP2–4.5 как вероятный.

Таблица 2.2 Прогнозы средних температур SSP из Шестого оценочного доклада МГЭИК [284]

SSP	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
Изменение температуры, °C (2021-240)	1,5 (1,2-1,7)	1,5 (1,2-1,8)	1,5 (1,2-1,8)	1,5 (1,2-1,8)	1,6 (1,3-1,9)
Изменение температуры, °C (2041–2060)	1,6 (1,2-2)	1,7 (1,3-2,2)	2 (1,6-2,5)	2,1 (1,7-2,6)	2,4 (1,9-3)
Изменение температуры, °C (2081–2100)	1,4 (1-1,8)	1,8 (1,3-2,)	2,7 (2,1-3,5)	3,6 (2,8-4,6)	4,4 (3,3-5,7)

Антропогенный углекислый газ считается основным компонентом при оценке вклада в изменение климата, он часто измеряется количественно в «частях на миллион эквивалента углекислого газа» (ppm CO₂), 1 ppm атмосферного CO₂ соответствует ~7,8 ГтCO₂.

Расчет вклада переменных CO₂ ppm на основе прокси-метрики CO₂. В этом исследовании считается, что 1 ppm = 7,8 Гт CO₂, который первоначально выбрасывается. Затем используется формула CDIAC для выбросов CO₂, согласно которой естественные поглотители (океан и биосфера) поглощают 55% антропогенных выбросов. Таким образом, выброс CO₂ в атмосферу составляет 45%, что соответствует 1 ppm CO₂ в атмосфере = 17,3 Гт выбросов CO₂ от добычи нефти и газа. Таким образом все данные о выбросах ГтCO₂ преобразуются в ppm CO₂ для расчета размера вклада в атмосферу [372].

2.6.2. Построение вегетационной модели

Имея на основе проведенных мониторинговых измерений данные о микроклиматических условиях произрастания рассматриваемых лесных сообществ, с помощью модели LPJ-GUESS становится возможным спрогнозировать варианты их развития в зависимости от показателей изменения климата.

LPJ-GUESS — это динамическая модель растительности и наземной экосистемы, предназначенная для региональных или глобальных

исследований. Используя данные о климатических условиях и концентрации углекислого газа в атмосфере, прогнозируются структурные, композиционные и функциональные свойства естественных ландшафтов.

LPJ-GUESS означает «Симулятор общей экосистемы Лунд-Потсдам-Йена». Модель была впервые разработана Беном Смитом из Лундского университета совместно с Потсдамским институтом исследования воздействия на климат и Институтом биогеохимии Макса Планка. При этом свой вклад в тестирование, уточнение и дальнейшее развитие модели вносили ученые и сотрудники институтов со всего мира.

Результатом моделирования становится ряд показателей, включающие в себя состав и покров растительности с точки зрения основных видов или функциональных типов растений (PFT), основные потоки биомассы в пересчете на углерод и органического вещества почвы, индекс площади листьев (LAI), чистую первичную продукцию (NPP), чистый баланс углерода в ландшафте, выбросы углерода от лесных пожаров, биогенные летучие органические соединения (БЛОС), суммарное испарение, стоки, а также потоки азота.

Климатические прогнозы брались в соответствии с Шестым оценочным докладом межправительственной группы экспертов [284].

Каждый возрастной класс (когорту) PFT при расчетах представлен средней особью, а травяные PFT представлены одной средней особью, аналогичной популяционному виду. Расчеты проводятся для условной территории, поделенной на участки, в пределах которых моделируются изменения, вызванные стохастическими (случайными) процессами, включая нарушения, которые разрушают всю или часть биомассы на затронутом участке.

Наиболее достоверные результаты достигаются за счет увеличения количества расчетов патчей, которые затем усредняются. Для достижения значимых результатов рекомендуется расчет 100 патчей. Программные возможности позволяют изменять данное значение, что позволяет, например,

увеличить скорость моделирования, за счет уменьшения количество патчей, однако это приведет к более случайному результату.

Перед запуском модели необходимо создать файл, содержащий климатические параметры, которые станут основой для моделирования. Для этого предусмотрен инструмент GetClim. Для проведения глобальных и региональных исследований достаточно генерируемого файла по заданным координатам. Для учета микроклиматических особенностей данные уточняются с помощью натурных данных мониторинга. Для расчетов динамики в условиях изменения климата указываются аномалии температуры и содержания углерода относительно современных условий (рисунок 2.14).

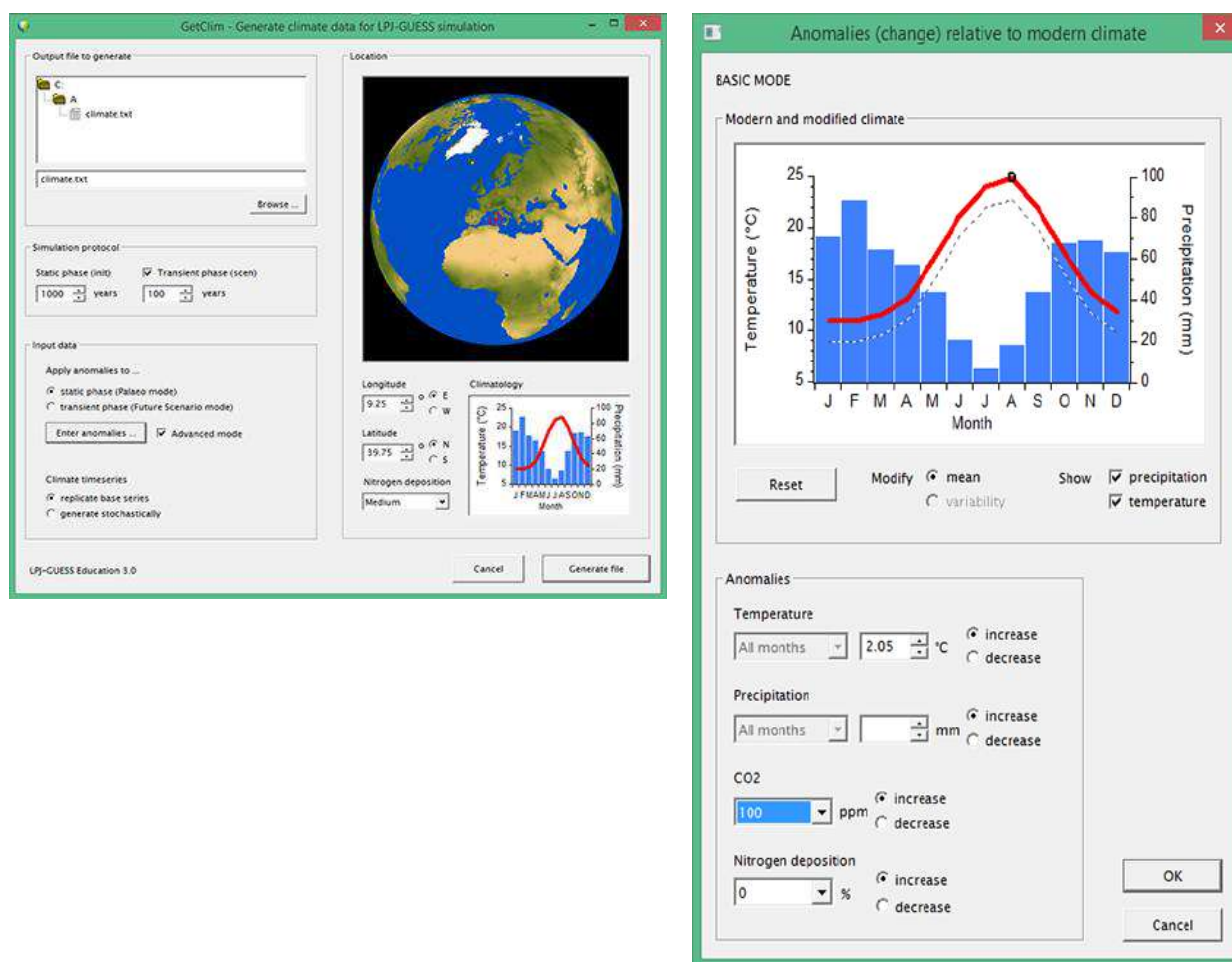


Рисунок 2.14 – Создание климатического файла в GetClim с указанием аномалий

Моделирование состоит из двух фаз. На первом статическом этапе модель опирается на неизменные климатические данные в течение 10 лет, что

необходимо для запуска и «раскрутки», во время которой состояние растительности и почвы переходит из «голой земли» в относительно устойчивое состояние. В получаемых результатах это отображается как случайные возмущения и массовая гибель биомассы.

Далее происходит расчет «Сценария будущего», в котором данные о современных условиях используются на статической фазе моделирования, а аномалии применяются таким образом, что указанное изменение достигается в последний год моделирования.

При выводе результатов моделирования используются сокращенные названия функциональных групп растительности и рассчитанных для них показателей.

TeNE вечнозеленые деревья с игольчатыми листьями умеренного пояса

TeBS теневыносливое широколиственное летнезеленое умеренного пояса

TeBE широколиственное вечнозеленое умеренного пояса

IBS теневыносливые широколиственные леса

TrBE тропические широколиственные вечнозеленые леса

TrIBE тропические теневыносливые широколиственные вечнозеленые леса

TrBR тропические широколиственные дождезеленые леса

C3G Многолетние травы, которые при фотосинтезе улавливают 3 атома углерода

C4G Многолетние травы, которые при фотосинтезе улавливают 4 атома углерода, чаще всего встречаются у тропических видов.

2.7. Промежуточные выводы по разделу

Учитывая сформулированные представления о субсредиземноморских лесных ландшафтах, их функционировании и динамике в условиях климатических изменений, основываясь на выбранной методологии и методике исследования функционирования и динамики лесных ландшафтов, была сформулирована структура исследований функционирования и динамики низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов в условиях изменения климата (рисунок 2.15).



Рисунок 2.15 Схема проведения исследования

Программа исследований содержит следующие ключевые блоки:

1. Исследование теоретико-методологические представлений об основах формирования и функционирования субсредиземноморских лесных ландшафтов;
2. формирование методологии и методики исследований в области изучения функционирования и динамики региональных геоэкосистем в условиях изменения климата;
3. на основе экспериментальных данных рассчитать показатели функционирования лесных ландшафтов (радиационный, тепловой и водный балансы);
4. на основе полученных данных об изменении климата и показателей динамики растительности провести оценку и прогноз изменений структуры лесных ландшафтов на территории Юго-Восточного Крыма.

РАЗДЕЛ 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИАЦИОННОГО, ТЕПЛОВОГО И ВОДНОГО БАЛАНСОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НИЗКОГОРНЫХ СУБСРЕДИЗЕМНОМОРСКИХ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ

3.1. Результаты расчета радиационного баланса

3.1.1. Радиационный баланс в пределах открытого участка

При рассмотрении радиационного баланса открытого участка можно проследить основные тенденции его изменения во внутригодовой и межгодовой динамике.

При рассмотрении данных за последние 10 лет наблюдаются значительные колебания значений годового баланса с минимумом в 2021 г. (855 МДж/м²) и максимумом в 2017 г. (1126 МДж/м²). Таким образом амплитуда значений годового радиационного баланса достигает 271 МДж/м² (рисунок 3.1). При этом линия тренда характеризуется ростом среднего многолетнего значения радиационного баланса, хотя в последние годы наблюдается снижение рассматриваемого показателя.

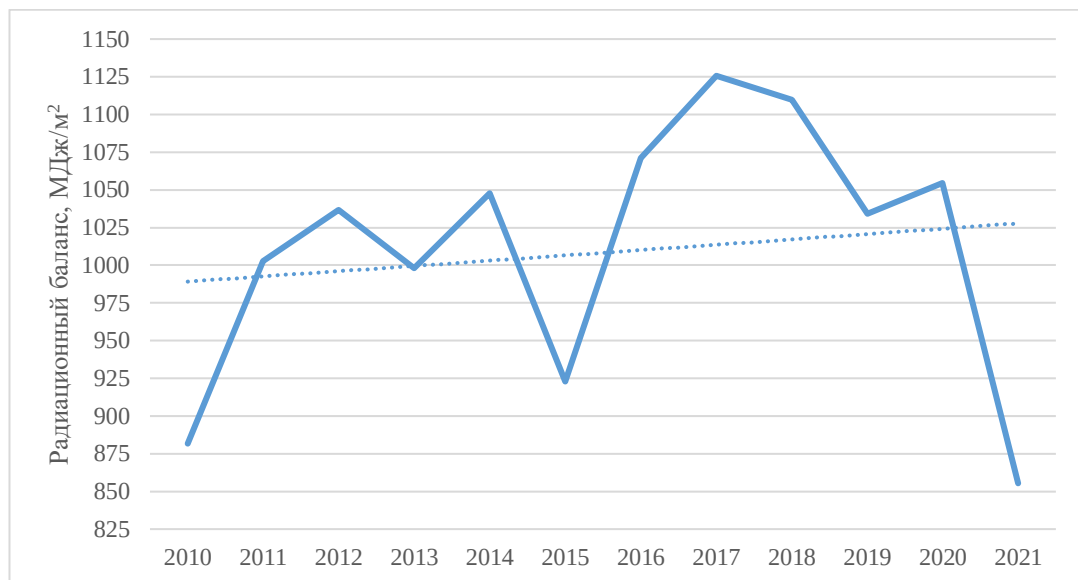


Рисунок 3.1 – Величины годового радиационного баланса территории КЛЭС, МДж/м²

При рассмотрении внутригодовой динамики закономерно выделяются два периода (рисунок 3.2): положительный баланс в летний период с марта по

октябрь, и отрицательный в зимний, с ноября по февраль. Наименьшее значение наблюдается в декабре и составляет $-176,3$ МДж/м², а максимальное – в июле и составляет $341,8$ МДж/м². Переход от наименьшего значения к наибольшему и обратно происходит циклично, при смене сезонов года без резких колебаний.

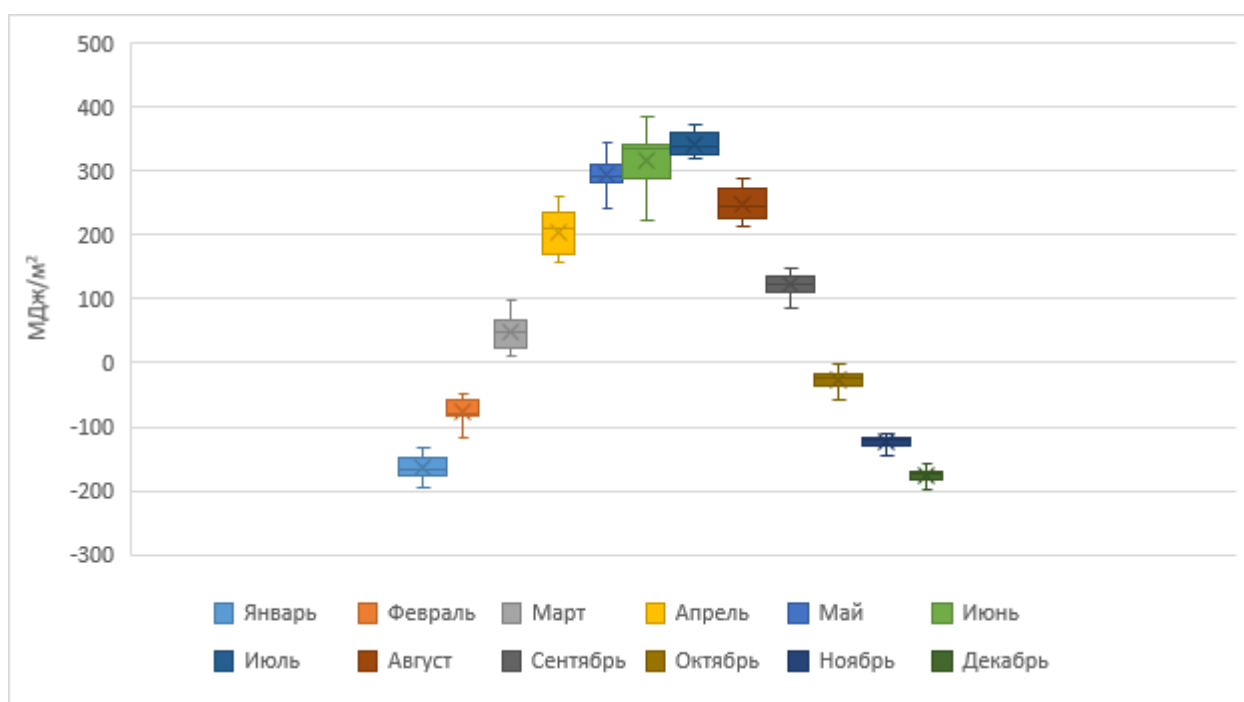


Рисунок 3.2 – Внутригодовые средние значения радиационного баланса по месяцам, МДж/м²

Анализируя показатели радиационного баланса по месяцам за период 2010–2021 годы заметно, что наибольший разброс величин характерен для теплого периода года, в то время как зимой перепады минимальны (рисунок 3.2). Наибольшая амплитуда изменения значений отмечается в апреле и июне. Учитывая слабые зимние перепады, можно предположить, что изменчивость значений радиационного баланса именно летних месяцев отражается в колебаниях значений годового баланса.

3.1.2. Радиационный баланс пушистодубового леса

Описанные выше значения радиационного баланса относятся к открытому горизонтальному участку без учета растительного покрова. Пушистодубовый лес формирует собственный кроновый, рельеф, который задерживает и отражает некоторое количество поступающей солнечной радиации на своей поверхности, а часть пропускает в подпологовое пространство. Степень пропускания кронами солнечной радиации зависит от сомкнутости крон и их плотности, наличия просветов внутри кроны (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Основные параметры древесного яруса фации пушистодубового леса

№ Точки	Высота деревьев, м	Сомкнутость крон, %	Плотность кроны, %
1	5,5	80	95
2	5,5	60	80
3	6	60	85
4	5,5	60	90
5	5,5	30	50
6	5,5	70	50
7	4	100	30
8	2	90	40
9	3,5	100	50
10	3	95	50
11	5,5	80	45
12	5	100	10
13	3,5	30	30
14	3,5	70	50
15	3,5	50	20
16	5,5	80	30
17	4,5	90	30
18	5,5	60	60
19	1,7	70	60
20	3,5	100	50
21	3,5	100	100
22	0,3	0	0
23	3,5	40	10
24	1,5	20	2
25	3	80	10

Для лиственных пород деревьев характерно сезонное изменение количества листвы в кроне, вплоть до ее отсутствия в зимний период. Для более полного описания состояния крон деревьев и особенностей задержания ими поступающей радиации, наши измерения проводились в летний период, период вегетации и состояния максимального развития кроны. Под сомкнутостью крон понимается доля площади поверхности земли, занятая проекциями крон. Но данный показатель не отражает реального количества поверхности земли, находящегося в тени кроны. Поэтому для более корректного описания крон также рассматривается и ее плотность.

Стоит отметить неравномерность поступления солнечной радиации под полог леса, что объясняется наличием участков, незакрытых кронами, и пространственно-временным распределением теневых масок. Количество поступающей солнечной радиации на конкретную точку поверхности зависит от ее ориентации относительно направления солнечных лучей, т.е. определяется крутизной и экспозицией склонов кронового рельефа (рисунок 3.3).

На основании полученных моделей крутизны и экспозиции склонов кронового рельефа получено поступление суммарной солнечной радиации на поверхность крон в разное время суток (таблица 3.2). Наблюдается характерное распределение поступающей солнечной радиации по склонам кронового рельефа, находящимся в северном полушарии, где наибольшее ее количество поступает на склоны южной экспозиции. На склонах крон западных и восточных экспозиций отмечается примерно равные значения поступающей солнечной радиации, различие лишь в распределении указанного количества во времени.

На склонах кронового рельефа северной экспозиции наблюдается наибольшее количество поступающей солнечной радиации на пологих склонах кронового рельефа ($0-3^\circ$), и это значение постепенно снижается при увеличении крутизны. Резкое снижение суммарной солнечной радиации происходит при увеличении крутизны склонов кронового рельефа более 30° .

Также отмечается увеличение количества суммарной солнечной радиации в 15:00 и 17:00 на склонах кронового рельефа средней крутизны (8–15°).

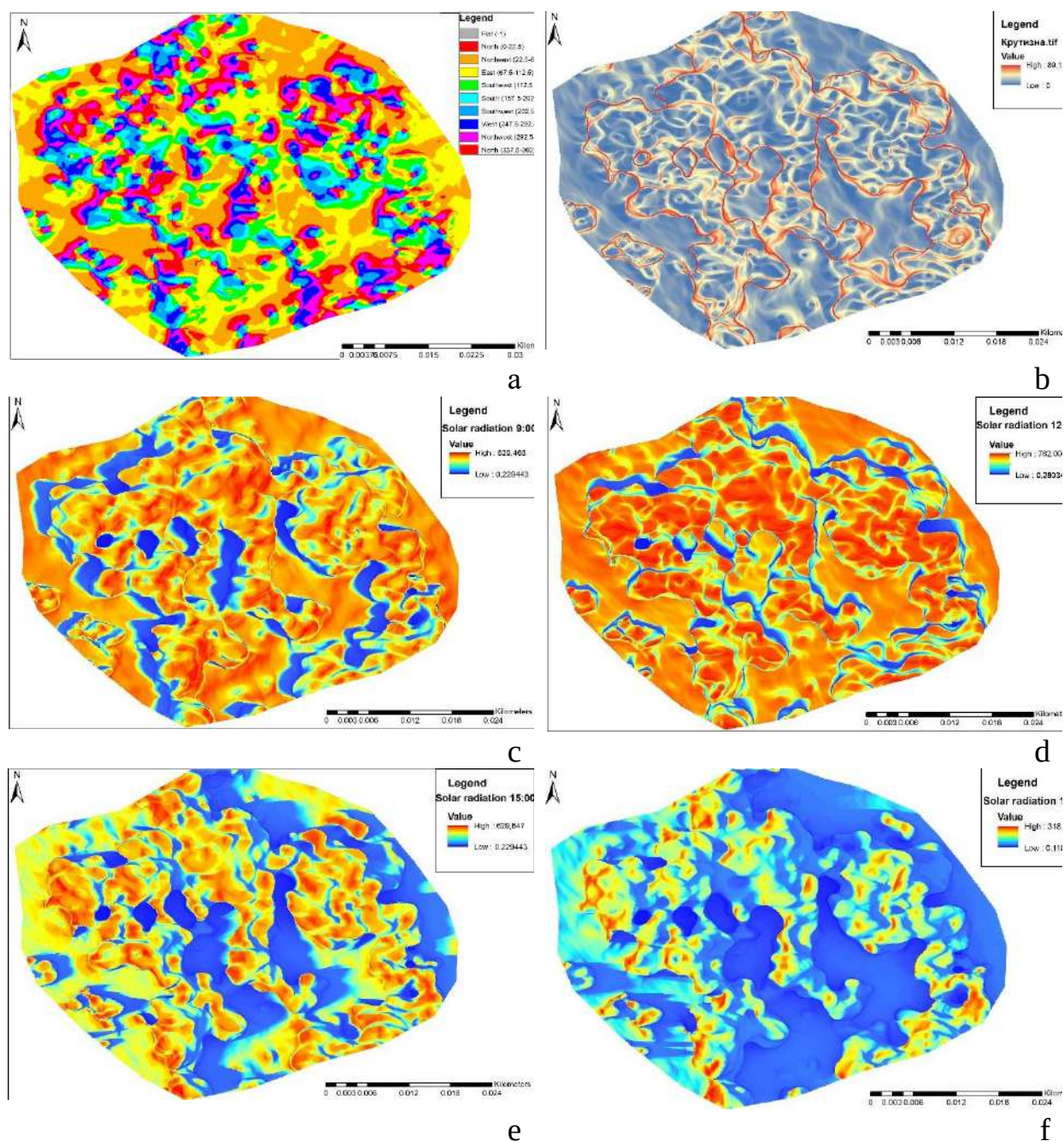


Рисунок 3.3 – Характеристики кронового рельефа в пушистодубовом лесу: экспозиция склонов кронового рельефа (a); крутизна кронового рельефа, ° (b); поступление суммарной солнечной радиации на поверхность кроны, $\text{Вт}/\text{м}^2$: 09:00 (c); 12:00 (d); 15:00 (e); 17:00 (f).

Таблица 3.2 – Расчетная величина поступления суммарной солнечной радиации на 17 июля 2022 года в зависимости от крутизны и экспозиции склонов кронового рельефа пушистодубового леса, Вт/м²

Экспозиция	Крутизна склонов					
	0–3°	3–8°	8–15°	15–30°	30–45°	более 45°
9:00						
С	474,67	451,76	468,18	401,19	283,67	71,90
СВ	489,01	504,42	507,66	512,77	495,98	387,28
В	506,82	525,67	540,86	572,54	593,33	337,65
ЮВ	503,63	518,61	550,90	578,77	601,29	552,61
Ю	499,55	497,89	505,78	499,89	416,27	390,14
ЮЗ	493,98	466,57	43,85	382,94	282,26	53,99
З	490,21	456,77	411,20	129,25	177,62	54,22
СЗ	483,93	428,46	430,45	328,88	202,02	49,90
12:00						
С	697,01	663,83	671,39	554,08	368,53	85,18
СВ	711,23	702,20	667,94	558,26	469,91	168,05
В	730,70	727,65	701,65	647,53	592,47	275,52
ЮВ	734,02	738,42	755,06	734,38	707,93	550,23
Ю	737,96	743,78	763,37	773,53	683,03	650,44
ЮЗ	737,43	731,01	672,14	735,73	682,88	482,94
З	730,75	717,54	705,88	605,50	567,68	279,01
СЗ	721,08	505,15	687,15	599,68	473,87	60,97
15:00						
С	474,65	299,71	468,06	401,07	48,89	69,72
СВ	475,59	456,40	413,34	319,29	121,19	78,52
В	485,78	462,68	407,84	269,32	91,98	36,71
ЮВ	490,58	474,51	458,10	379,02	308,43	84,64
Ю	499,55	497,89	505,78	499,89	45,73	390,14
ЮЗ	506,11	513,67	234,46	577,62	586,73	508,82
З	500,61	514,92	544,42	131,34	586,71	517,26
СЗ	496,56	74,06	520,40	521,43	495,79	317,89
17:00						
С	50,85	41,70	178,74	128,82	25,33	36,15
СВ	166,93	110,69	51,44	77,94	46,09	40,70
В	169,98	154,33	120,39	43,16	47,64	19,02
ЮВ	171,71	157,19	139,62	49,86	51,53	41,90
Ю	177,00	117,63	168,80	154,61	23,69	56,65
ЮЗ	182,28	185,85	22,72	197,31	235,39	59,29
З	179,92	53,62	152,40	27,77	37,10	301,15
СЗ	180,17	38,37	210,02	237,01	254,26	25,86
Сумма за сутки						
С	3958,27	5317,05	5111,05	4292,32	2059,90	789,53
СВ	5344,72	5254,15	4911,59	4572,83	3708,03	2241,04
В	5508,06	5470,72	5084,35	4710,69	3815,68	1854,26
ЮВ	5365,57	5510,57	5606,69	5241,09	5117,60	3984,59
Ю	5543,85	5544,62	5632,39	5573,38	3723,64	4360,25
ЮЗ	5548,32	5304,56	2780,25	1827,29	4877,03	3268,02

З	5496,73	5112,14	5195,77	3203,56	4406,58	147,75
СЗ	5493,69	5406,05	5156,53	4670,29	3777,11	1330,60

Максимальные значения для склонов кронового рельефа северной экспозиции фиксируются на пологих склонах ($0-3^\circ$) в 12:00, а величины поступления суммарной солнечной радиации в утренние и вечерние часы примерно одинаковые.

В утренние часы на склонах кронового рельефа южной экспозиции значения радиации незначительно выше, чем на северных, но с увеличением крутизны наблюдается значительное превышение. В целом для любого времени суток на пологих склонах кронового рельефа наблюдается наибольшее количество поступающей суммарной солнечной радиации, которое постепенно незначительно уменьшается с увеличением крутизны кронового рельефа. В 12:00 на рассматриваемых склонах отмечаются максимальные значения относительно склонов других экспозиций. В вечернее время 17:00 значения суммарной солнечной радиации значительно ниже, чем в утреннее время, которые резко уменьшаются при увеличении крутизны склонов кронового рельефа более 30° .

Поступление суммарной солнечной радиации на склоны кронового рельефа западной экспозиции в утренние часы отмечается резким спадом в изменении величин при крутизне склонов более 15° . Для полудня характерно постепенное снижение значений с резким уменьшением при увеличении крутизны более 45° . В 15:00 отмечаются максимальные значения относительно склонов кронового рельефа других экспозиций, в течении дня происходят незначительные колебания, без значительных уменьшений при изменении крутизны. В 17:00 значения солнечной радиации значительно ниже, чем в другое время суток с наибольшими значениями на крайне крутых склонах кронового рельефа (более 45°).

На склонах кронового рельефа восточной экспозиции в утреннее время фиксируются максимальные для этого времени значения относительно склонов кронового рельефа других экспозиций, значительное снижение

значений отмечается на крайне крутых склонах кронового рельефа крутизной более 45° . Аналогичное распределение значений по крутизне кронового рельефа происходит и в дневное время. Противоположная ситуация складывается в вечернее время (15:00 и 17:00), когда наибольшие значения наблюдаются на пологих склонах кронового рельефа, а при переходе на крутые склоны ($15\text{--}30^\circ$) кронового рельефа происходит резкое падение значений поступления суммарной солнечной радиации.

Усреднение суточных значений поступления суммарной солнечной радиации на поверхность склонов кронового рельефа разной крутизны позволяет оценить в целом ее распределение в зависимости от экспозиции. Таким образом, отмечается существенная разница в значениях поступающей солнечной радиации на склоны кронового рельефа северной и южной экспозиций (рисунок 3.4), что закономерно для Северного полушария. Характер распределения суммарной солнечной радиации на склонах кронового рельефа западной и восточной экспозиций примерно равны, однако на восточных и особенно юго-восточных экспозициях склонов кронового рельефа поступление суммарной солнечной радиации больше, что скорее всего связано с ориентацией склона, на котором располагается участок пушистодубового леса.

Аналогично любой поверхности, поступающая на рельеф крон солнечная радиация частично отражается. Количество отраженной радиации зависит от отражающей способности поверхности, альбедо, среднее значение для лиственного леса которого равно 18 %. Таким образом получаем следующее распределение элементов радиационного баланса для поверхности крон (таблица 3.3). Для отраженной и поглощенной радиации характерны существенные разбросы величин как во времени, так и в пространстве, сохраняя закономерную зависимость от крутизны и экспозиции склонов кронового рельефа. В течение светового дня элементы радиационного баланса увеличивают свое значение до максимума в 12:00, и снижают к 17:00.

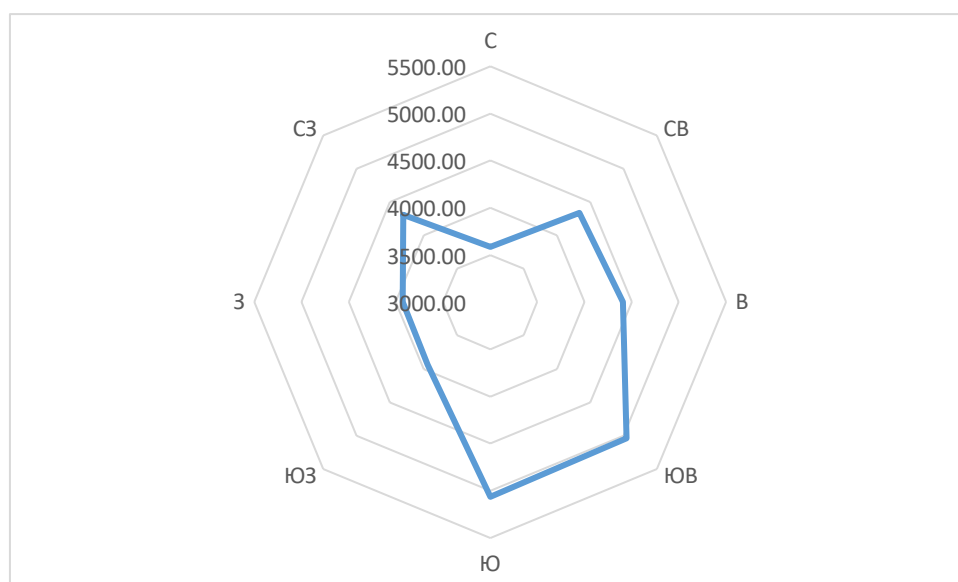


Рисунок 3.4 – Инсоляционная диссиметрия поступления суммарной солнечной радиации на склоны кронового рельефа разной экспозиции пушистодубового леса, Вт/м²

Таблица 3.3 – Величины элементов радиационного баланса поверхности крон участка пушистодубового леса, Вт/м²

Элементы радиационного баланса		Время суток			
		9:00	12:00	15:00	17:00
Суммарная радиация	Средняя	463,83	590,18	332,26	97,60
	Максимальная	593,33	763,37	505,78	178,74
	Минимальная	71,90	85,18	36,71	19,02
Отраженная радиация	Средняя	83,49	106,23	59,81	17,57
	Максимальная	106,80	137,41	91,04	32,17
	Минимальная	12,94	15,33	6,61	3,42
Поглощенная радиация	Средняя	380,34	483,95	272,45	80,03
	Максимальная	486,53	625,96	414,74	146,57
	Минимальная	58,96	69,85	30,10	15,60

Важно отметить, что представленные величины были бы верны в случае, если вся поступающая солнечная радиация задерживалась бы кронами, но в реальных условиях всегда существует определенный процент пропускания под полог леса. Следовательно, представленные выше значения завышены. Поэтому для описания вертикальной структуры распределения энергетических потоков в пушистодубовом лесу проводилось изучение количества пропускаемой кронами солнечной радиации.

Согласно регулярной сетке точек получена пространственно-временная структура освещенности подпологового пространства пушистодубового леса (рисунок 3.5).

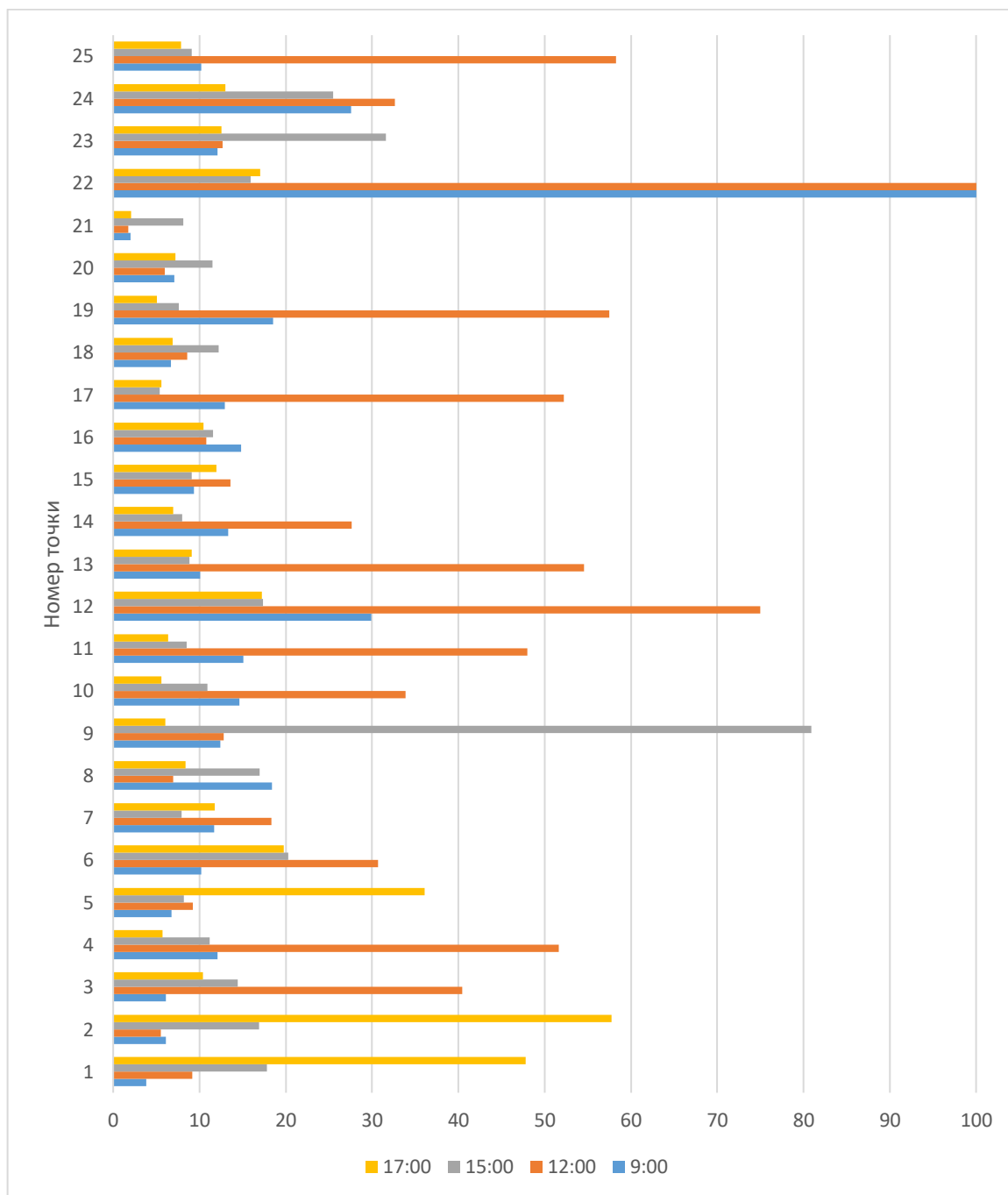


Рисунок 3.5 – Пространственно-временная структура доли пропускания суммарной солнечной радиации пологом леса.

Рисунок 3.5 демонстрирует существенную пространственно-временную неоднородность пропускания суммарной солнечной радиации кронами

деревьев. В большинстве случаев количество солнечной радиации, поступившей под крону, не превышает 20 % от изначального значения, при этом в тех же точках наблюдения фиксируются значения превышающие 40 и 50 % пропускания солнечной радиации. Представленная схема демонстрирует, что для каждой точки характерно свое время пропускания максимального и минимального количества радиации. Это объясняется изменением распределения просветов и теневых масок в пологе крон в зависимости от времени суток и угла попадания солнечных лучей. Ярким примером подобного изменения может служить точка № 22, в которой в первую половину дня поступает количество солнечной радиации, соответствующее открытому участку местности, а во вторую половину дня находится в тени.

Ранее Р.В. Горбунов с соавт. (2019) описали отсутствие корреляции между долей пропускания и характеристиками вертикальной структуры. Поэтому модель кронового рельефа не учитывалась при построении пространственной структуры величины пропускания суммарной солнечной радиации в разное время суток (рисунок 3.6).

При рассмотрении пространственного изменения пропускания суммарной солнечной радиации пологом леса выделяются участки с максимальной долей пропускания, сами по себе они являются открытыми, не попадающие под крону деревьев, или граничащими с открытыми участками леса. Но так как они находятся внутри растительного сообщества, то окружающие их соседние участки оказывают значительное влияние на протекающие в них процессы распределения поступающей энергии. В свою очередь, открытые и полуоткрытые участки так же оказывают обратное влияние. Таким образом, в течение светового дня формируются условия, в которых окружающие деревья формируют устойчивую тень на соседнем участке, а открытые участки позволяют суммарной солнечной радиации беспрепятственно проникать под полог леса.

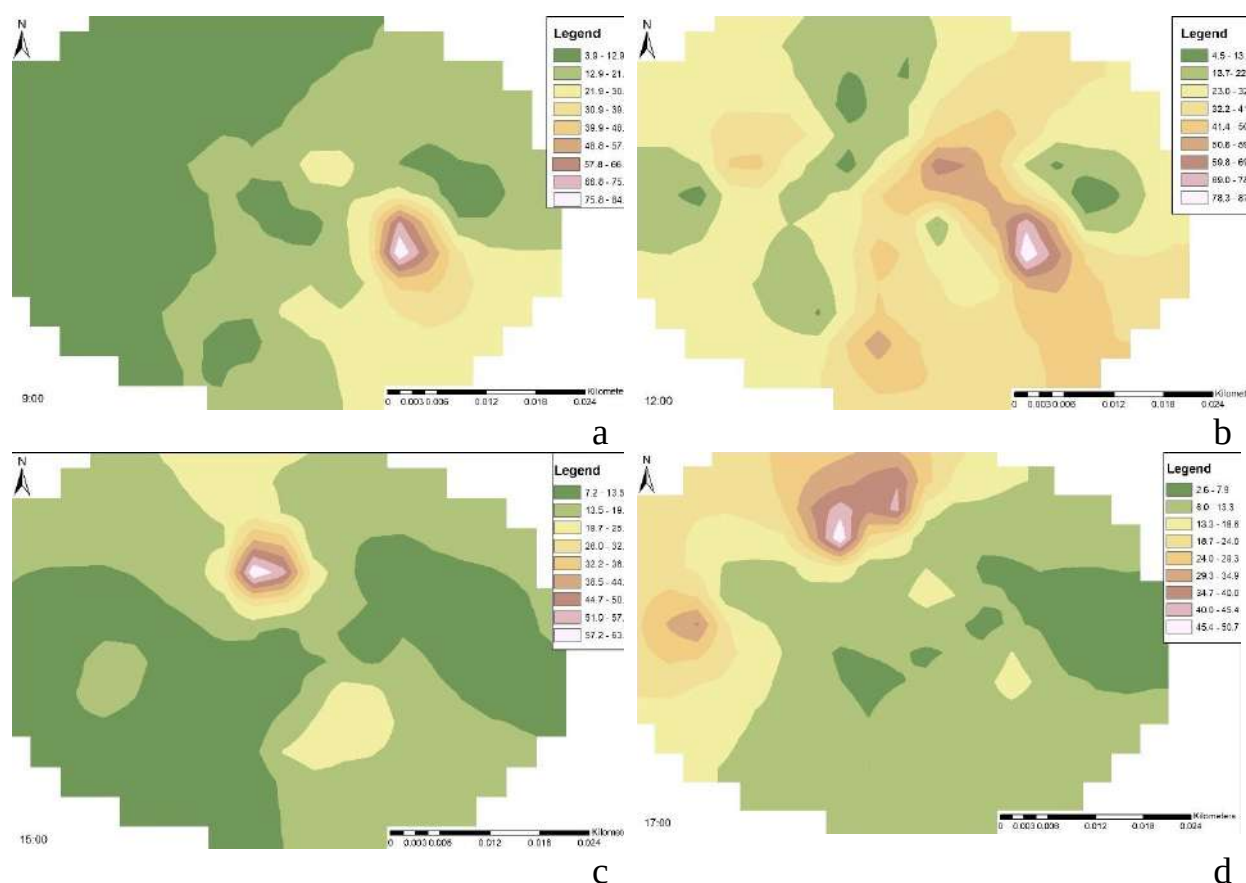


Рисунок 3.6 – Пространственное изменение доли пропускания суммарной солнечной радиации пологом пушистодубового леса, %: 09:00 (a); 12:00 (b); 15:00 (c); 17:00 (d).

Проанализировав полученные значения поступления суммарной солнечной радиации и степень пропускания ее пологом леса, получены статистические значения величин суммарной солнечной радиации, поступающих в подпологовое пространство (таблица 3.4).

Проходя через кроны деревьев, солнечная радиация также делится на отраженную и поглощенную. Отраженное коротковолновое излучение невозможно оценить на данный момент из-за сложности и мозаичности поверхностей под пологом крон.

Таблица 3.4 – Количество суммарной солнечной радиации, прошедшей через кроны деревьев, Вт/м²

Суммарная солнечная радиация	Время			
	9:00	12:00	15:00	17:00

Средняя	72,72	183,67	52,61	13,61
Максимальная	463,83	590,18	268,77	56,35
Минимальная	9,43	10,45	17,85	2,02

Поглощенная и преобразованная в длинноволновую радиация образует тепловой поток излучения подстилающей поверхности, направленный в атмосферу, и собственное тепловое излучение атмосферы на поверхность земли. На основе этих двух величин получены значения эффективного излучения (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Величины элементов длинноволновой части радиационного баланса пушистодубового леса в период измерений, Вт/м²

Элементы радиационного баланса	Время			
	9:00	12:00	15:00	17:00
Тепловое излучение подстилающей поверхности	406,90	409,68	414,16	415,29
Собственное тепловое излучение атмосферы	334,12	335,65	323,88	316,35
Эффективное излучение подстилающей поверхности (поверхность почвы, лиственной опад, ярус трав)	82,80	84,10	100,00	108,44

Сравнивая значения таблиц 3.4 и 3.5, даже не имея возможности рассчитать коротковолновую часть излучения радиационного баланса, отмечается превышение исходящей радиации над приходящей в рамках средних значений. Исключение составляет полуденное время, на которое приходится дневной максимум поступающей суммарной солнечной радиации. Кроме того, отмечается наличие значений поступающей радиации, существенно превышающих эффективное излучение подстилающей поверхности. Это объясняется наличием существенных просветов в кроне деревьев, формирующих положительный радиационный баланс подкоронового пространства леса, в отличие от основной части, находящейся в тени крон деревьев, с отрицательным радиационным балансом. Данное распределение

значений демонстрирует сложную организацию и протекание процессов распределения потоков вещества и энергии в пушистодубовом лесу.

3.1.3. Радиационный баланс можжевельного леса

Для можжевельного леса также характерна сложная морфометрия кронового рельефа и неоднородное пропускание кронами солнечной радиации под полог леса (рисунок 3.7). Однако стоит отметить, что, наравне с описанными процессами, важную роль играет характер роста можжевельника высокого. Для данного типа леса характерна вертикально вытянутая форма дерева, образующая в большинстве случаев широкие конусы, что дает относительно большое значение сомкнутости крон при фактически небольшом закрытии неба. Также стоит отметить влияние горного рельефа, при котором сообщество произрастает на склонах южной экспозиции крутизной до 45° , из-за чего солнечные лучи проникают под полог сквозь ветви разных уровней. При этом высота деревьев и густой рост ветвей вдоль всего ствола обеспечивают наличие широкой тени даже на соседних относительно открытых участках. Поэтому оценка рассматриваемого сообщества только с точки зрения сомкнутости крон также являлась бы некорректной.

На основании полученных моделей крутизны и экспозиции склонов кронового рельефа получено поступление суммарной солнечной радиации на поверхность крон в разное время суток (таблица 3.6). Согласно рисунку 3.7 и таблице 3.6 наблюдается распределение поступающей солнечной радиации согласно ориентации склона, где наибольшее ее количество поступает на склоны южной экспозиции, а северная экспозиция находится в некотором затенении в зависимости от крутизны склона. На склонах западной и восточной экспозиции отмечаются равные значения поступающей солнечной радиации. В целом распределение радиации происходит достаточно равномерно с плавным увеличением значений от склонов северной экспозиции к южным.

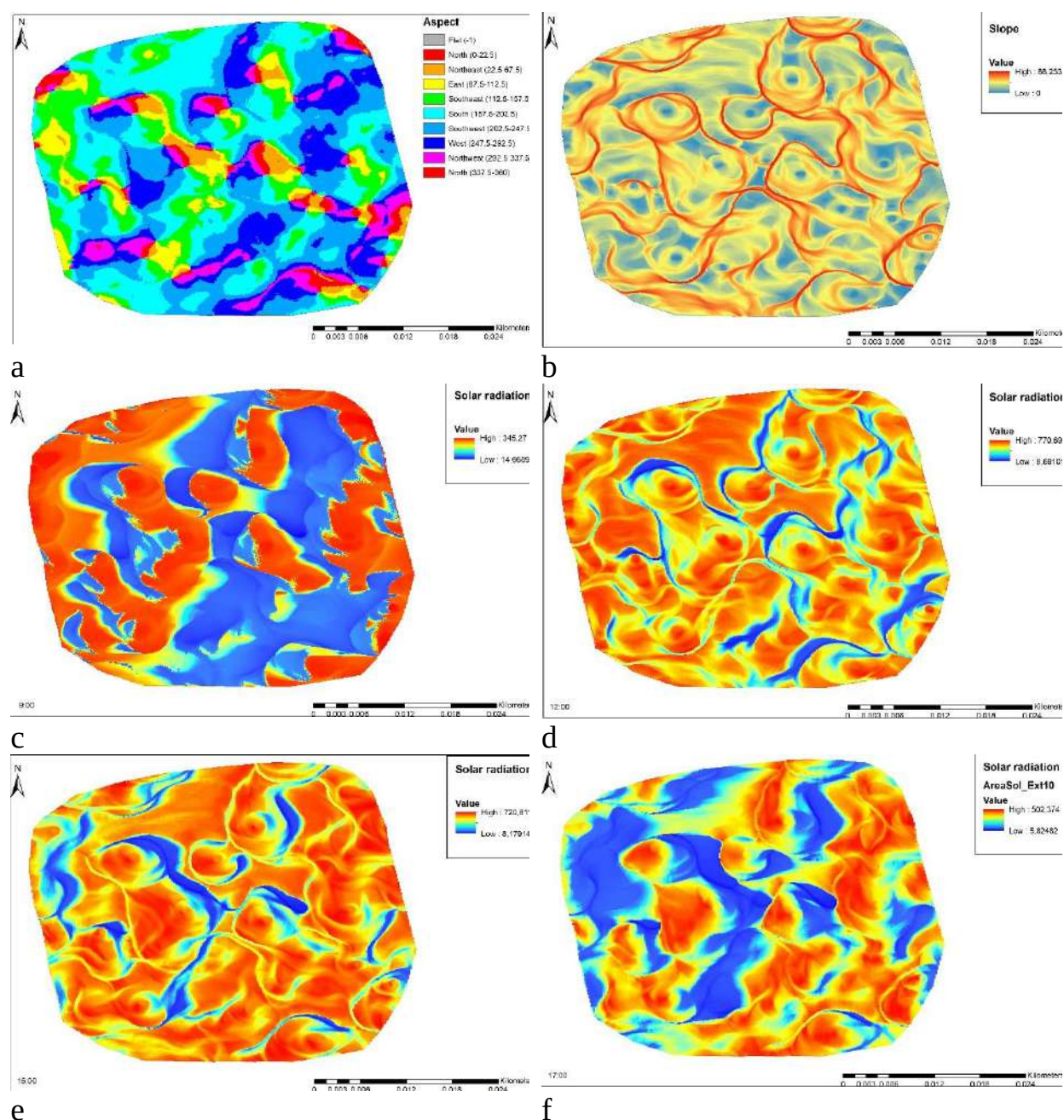


Рисунок 3.7 – Характеристики кронового рельефа в можжевельниковом лесу: экспозиция склонов кронового рельефа (а); крутизна кронового рельефа, ° (b); поступление суммарной солнечной радиации на поверхность кроны в 9:00, Вт/м² (c); Поступление суммарной солнечной радиации на поверхность кроны в 12:00, Вт/м² (d); Поступление суммарной солнечной радиации на поверхность кроны в 15:00, Вт/м² (e); Поступление суммарной солнечной радиации на поверхность кроны в 17:00, Вт/м² (f)

Таблица 3.6 – Расчетная величина поступления суммарной солнечной радиации 17 июля 2022 года (дата проведения полевых измерений) в

зависимости от крутизны и экспозиции склонов кронового рельефа в можжевелевом лесу, Вт/м²

Экспозиция	Крутизна склонов					
	0–3°	3–8°	8–15°	15–30°	30–45°	более 45°
	9:00					
С	268,32	263,33	281,24	267,93	253,88	171,89
СВ	255,26	252,96	235,59	286,65	291,26	247,55
В	252,01	238,80	229,90	264,83	281,73	263,07
ЮВ	243,47	238,70	229,40	233,40	261,62	296,12
Ю	232,32	229,64	218,92	117,54	264,03	272,20
ЮЗ	199,80	209,54	229,53	167,29	165,08	96,95
З	239,55	196,74	224,02	183,76	128,54	62,84
СЗ	255,71	225,71	254,17	245,20	188,14	67,16
12:00						
С	631,04	609,93	574,55	497,18	358,48	146,09
СВ	640,03	630,10	570,99	592,68	493,75	263,17
В	664,46	654,77	663,52	662,23	636,54	469,56
ЮВ	670,46	691,79	708,21	720,38	713,29	589,73
Ю	670,76	686,83	689,90	698,60	695,81	565,35
ЮЗ	646,53	626,22	640,27	625,89	577,42	427,51
З	634,39	599,06	595,06	557,23	459,62	238,89
СЗ	623,52	579,18	555,64	495,58	358,67	111,52
15:00						
С	574,91	556,81	551,77	491,79	389,39	196,80
СВ	584,23	531,43	467,80	403,11	260,20	77,04
В	575,74	532,60	452,02	389,15	289,17	107,98
ЮВ	578,15	545,86	476,50	400,17	378,29	247,87
Ю	592,19	598,48	578,83	585,73	593,82	482,55
ЮЗ	593,67	635,22	644,82	676,82	682,96	612,84
З	596,52	614,19	636,07	664,13	665,28	561,57
СЗ	593,05	587,02	573,28	569,59	520,05	341,82
17:00						
С	273,17	282,44	304,32	286,10	267,92	177,10
СВ	254,00	245,56	195,80	160,69	88,66	38,01
В	254,42	210,57	169,99	122,69	66,13	44,83
ЮВ	245,71	225,25	199,41	135,91	91,72	58,49
Ю	282,25	287,77	227,27	220,50	188,88	192,00
ЮЗ	284,94	315,33	318,37	361,51	397,02	397,08
З	292,10	328,40	365,88	414,68	458,58	456,73
СЗ	285,24	319,68	334,01	366,23	376,07	321,16
Сумма за сутки						
С	4777,38	4706,90	4613,18	4067,73	3216,53	1652,03
СВ	4729,75	4623,63	4195,21	4166,31	3374,45	1863,73
В	4769,76	4598,78	4310,61	4266,82	4017,07	2890,82
ЮВ	4784,98	4804,30	4606,17	4440,88	4403,00	3680,60
Ю	4872,39	4981,83	4784,71	4732,95	4790,28	3945,92
ЮЗ	4644,16	4748,31	4883,50	4783,61	4653,39	3928,75
З	4775,30	4679,57	4770,32	4660,30	4346,98	3346,59
СЗ	4805,51	4634,09	4533,00	4267,79	3562,99	2054,94

На склонах кронового рельефа северной экспозиции наблюдается наибольшее количество поступающей солнечной радиации на пологих склонах ($0-3^\circ$), и это значение постепенно снижается при увеличении крутизны. Резкое снижение суммарной солнечной радиации происходит при увеличении крутизны склонов более 30° . Также отмечается увеличение количества суммарной солнечной радиации в 12:00 и 15:00. В вечернее время в 17:00 крутизна склонов незначительно отражается на количестве поступающей радиации, заметное снижение наблюдается только на очень крутых склонах (более 45°). Максимальные значения для склонов северной экспозиции фиксируются на пологих склонах ($0-3^\circ$) в 12:00, а величины поступления суммарной солнечной радиации в утренние и вечерние часы примерно одинаковые.

На склонах кронового рельефа южной экспозиции значения радиации незначительно ниже, чем на склонах северных экспозиций, но на очень крутых склонах наблюдается значительное превышение. В 12:00 на рассматриваемых склонах отмечаются максимальные значения относительно склонов других экспозиций, в это время отмечается рост показателей с увеличением крутизны, и только на склонах более 45° происходит снижение. В 15:00 и 17:00 значения суммарной солнечной радиации незначительно колеблются на склонах разной крутизны, только при крутизне более 45° наблюдается уменьшение значений.

Поступление суммарной солнечной радиации на склоны кронового рельефа западной экспозиции утром и днем характеризуются уменьшением величин с увеличением уклона. Для 15:00 наблюдается постепенное увеличение значений с резким спадом при увеличении крутизны более 45° . В 17:00 в течение дня происходит постепенный рост значений при увеличении крутизны.

На склонах кронового рельефа восточной экспозиции максимальные значения поступающей солнечной радиации отмечаются на крутых склонах крутизной $30-45^\circ$. Аналогичное распределение значений по крутизне

происходит и в дневное время, с резким спадом на крайне крутых склонах. Обратная картина происходит в вечернее время (15:00 и 17:00), наибольшие значения поступления суммарной солнечной радиации наблюдаются на пологих склонах, которые уменьшаются при переходе на крутые склоны.

Для каждого склона характерен значительный рост поступающей солнечной радиации к 12:00, небольшое уменьшение в 15:00, и резкий спад к 17:00. Усреднение суточных значений поступления суммарной солнечной радиации на поверхность склонов разной крутизны позволяет оценить в целом ее распределение на поверхности кронового рельефа в зависимости от экспозиции. Однако, следует отметить значительный вклад распределения теневых масок. Так, значения поступающей радиации могут отличаться в несколько раз, наибольшие различия отмечаются в полдень. Так, например, на южном склоне минимальные значения радиации опускаются до 20 Вт/м² в тени, а значения на освещенном участке достигают до 345 Вт/м² утром, 770 Вт/м² в 12:00 и 500 Вт/м² в 17:00. Таким образом, отмечается существенное сглаживание средних значений поступающей солнечной радиации на склоны различной экспозиции (рисунок 3.8).

Аналогично пушистодубовому лесу на основании значения альбедо, получено количество отраженной радиации. Таким образом получаем следующее распределение элементов радиационного баланса для поверхности крон (таблица 3.7).

Аналогично суммарной солнечной радиации, для отраженной и поглощенной характерны существенные разбросы величин как во времени, так и в пространстве, сохраняя закономерную зависимость от крутизны и экспозиции склонов кронового рельефа. В течение светового дня элементы радиационного баланса увеличивают свое значение до максимума в 12:00, и снижают к 17:00.



Рисунок 3.8 – Инсоляционная диссиметрия поступления суммарной солнечной радиации на склоны кронового рельефа разной экспозиции можжевельного леса, Вт/м²

Таблица 3.7 – Величины элементов радиационного баланса поверхности крон можжевельного леса, Вт/м²

Элементы радиационного баланса		Время суток			
		9:00	12:00	15:00	17:00
Суммарная радиация	Средняя	224,65	566,92	505,40	253,97
	Максимальная	296,12	720,38	682,96	458,58
	Минимальная	62,84	111,52	77,04	38,01
Отраженная радиация	Средняя	31,45	79,36	70,76	35,55
	Максимальная	41,45	100,85	95,61	64,20
	Минимальная	8,79	15,61	10,78	5,32
Поглощенная радиация	Средняя	193,20	487,55	434,64	218,41
	Максимальная	254,66	619,52	587,34	394,38
	Минимальная	54,04	95,91	66,25	32,69

Рисунок 3.9 демонстрирует существенную пространственно-временную неоднородность пропускания суммарной солнечной радиации кронами деревьев. В большинстве случаев количество солнечной радиации, поступившей под крону, не превышает 10–20 % от изначального значения. При этом в тех же точках наблюдения фиксируются значения, превышающие 40 и 50 % пропускания солнечной радиации.

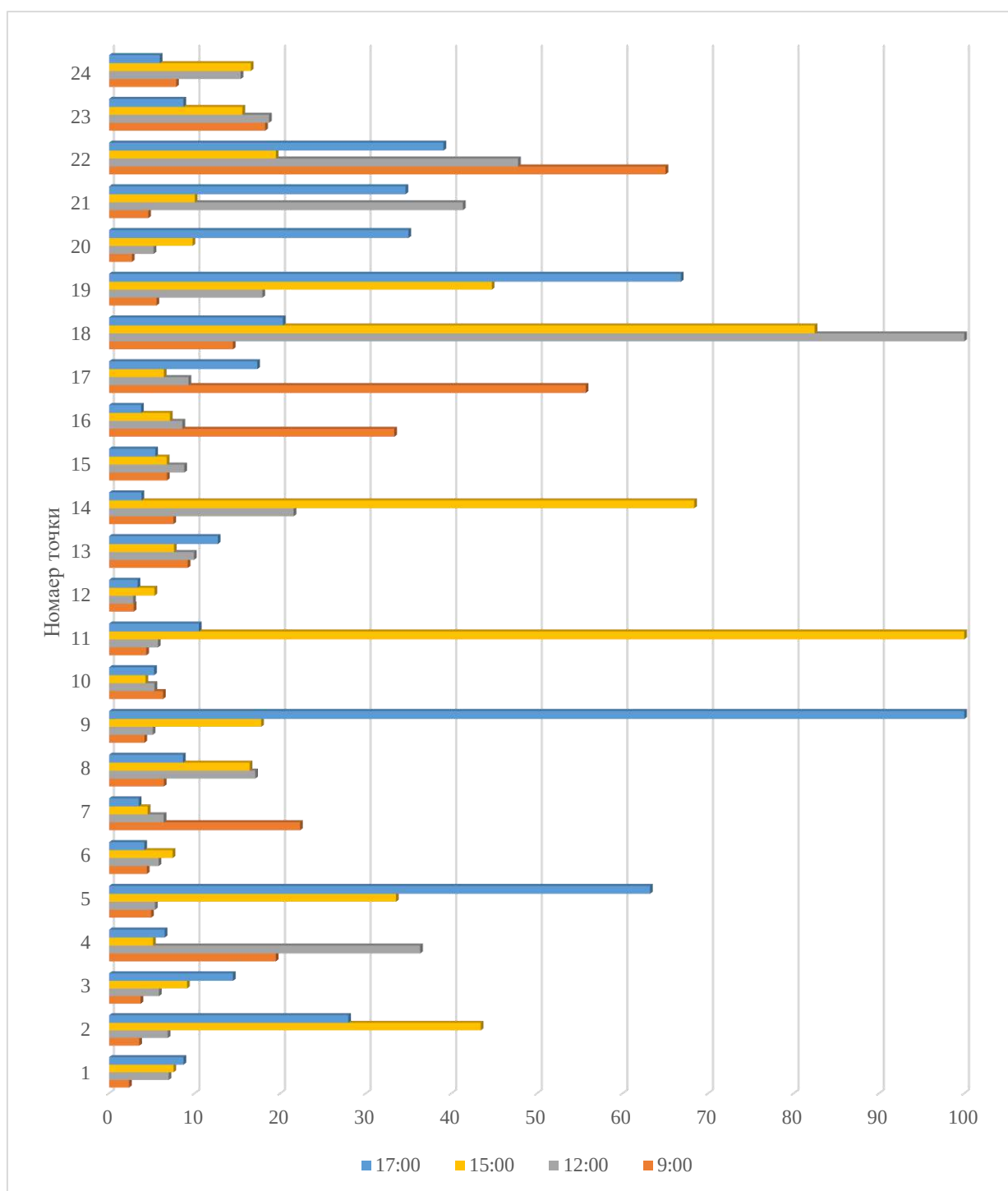


Рисунок 3.9 – Пространственно-временная структура доли пропускания суммарной солнечной радиации пологом можжевельного леса, %

Представленная схема демонстрирует, что для каждой точки характерно свое время пропускания максимального и минимального количества радиации. Это объясняется изменением распределения просветов и теневых масок в пологе крон в зависимости от времени суток и угла падения солнечных

лучей. Наибольший перепад в изменении значений фиксируется в точках № 9 и 11, в которых в определенную часть дня поступает количество солнечной радиации, соответствующее открытому участку местности.

Как и в пушистодубовом лесу, модель кронового рельефа не учитывалась при построении пространственной структуры величины пропускания суммарной солнечной радиации в разное время суток в можжевелевом сообществе (рисунок 3.10).

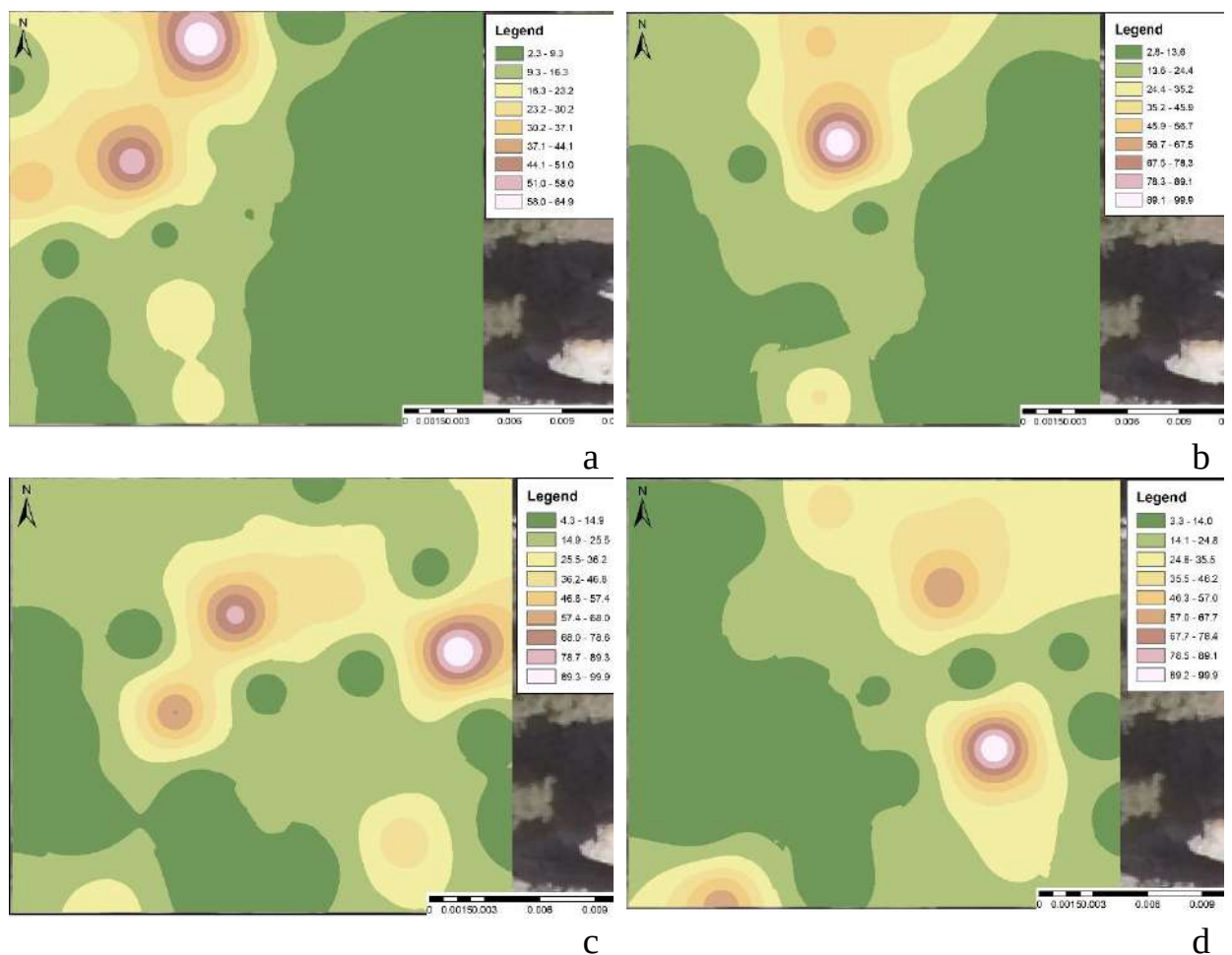


Рисунок 3.10 – Пространственное изменение доли пропускания суммарной солнечной радиации пологом можжевелевого леса, %: 09:00 (a); 12:00 (b); 15:00 (c); 17:00 (d).

При рассмотрении пространственного изменения пропускания суммарной солнечной радиации пологом леса выделяются участки с максимальной долей пропускания, сами по себе они являются открытыми, не

попадающим под крону деревьев, или граничащими с открытыми участками леса. Но так как они находятся внутри растительного сообщества, то окружающие их соседние участки оказывают значительное влияние на протекающие в них процессы распределения поступающей радиации. В свою очередь открытые и полуоткрытые участки так же оказывают обратное влияние. Таким образом, в течение светового дня формируются условия, в которых окружающие деревья формируют устойчивую тень на соседнем участке, а открытые участки позволяют проникать суммарной солнечной радиации беспрепятственно под полог леса.

Проанализировав полученные значения поступления суммарной солнечной радиации и степень пропускания ее пологом леса, получены статистические значения величин суммарной солнечной радиации, поступающие в подпологовое пространство (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Количество суммарной солнечной радиации, прошедшей через кроны деревьев, Вт/м²

Суммарная солнечная радиация	Время			
	9:00	12:00	15:00	17:00
Средняя	25,23	93,78	118,51	57,67
Максимальная	124,77	543,84	517,97	271,73
Минимальная	4,48	15,26	22,02	9,05

На основе величин теплового потока излучения подстилающей поверхности и собственного теплового излучения атмосферы получены значения эффективного излучения (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Величины элементов длинноволновой части радиационного баланса можжевельного леса в период измерений, Вт/м²

Элементы радиационного баланса	Время			
	9:00	12:00	15:00	17:00
Тепловое излучение подстилающей поверхности	376,78	427,19	427,55	414,90
Собственное тепловое излучение атмосферы	440,07	479,61	476,47	473,98
Эффективное излучение подстилающей поверхности (поверхность почвы, листовой опад, ярус трав)	74,59	65,23	61,75	71,53

Отмечается превышение исходящей радиации над приходящей в рамках средних значений в утреннее и вечернее время, а положительный баланс отмечается в 12:00 и 15:00, в период дневного максимума поступающей суммарной солнечной радиации. Кроме того, отмечается наличие значений поступающей радиации, существенно превышающих эффективное излучение подстилающей поверхности. Это объясняется наличием существенных просветов в кроне деревьев, формирующих положительный радиационный баланс подкронового пространства леса, в отличие от основной части, находящейся в тени крон деревьев, с отрицательным радиационным балансом.

3.1.4. Сравнительный анализ радиационного баланса пушистодубового и можжевельного лесов

В пушистодубовых и можжевельных лесах прослеживается единая закономерность изменения значений поступающей солнечной радиации в течение суток и в распределении по экспозициям склонов кронового рельефа. Различие значений поступающей солнечной радиации на участки с одинаковыми условиями может объясняться нахождением некоторых из них в затененной части.

И в пушистодубовом, и в можжевельном лесу наибольшее количество солнечной радиации приходится на склоны южной экспозиции, при этом отмечаются превышения значений за счет ориентации склонов рельефа, в пушистодубовом лесу, расположенном на склоне восточной экспозиции, значения солнечной радиации, поступающей на поверхность кронового рельефа восточной экспозиции, превышают значения на склонах западной экспозиции; можжевельный лес располагается на склоне южной экспозиции хребта Карагач – завышены значения на склонах кронового рельефа южной экспозиции.

При рассмотрении величин элементов радиационного баланса на обоих участках максимум суммарной радиации приходится на 12:00, при этом в 9:00 в можжевельном сообществе наблюдается низкое значение по отношению к

пушистодубовому, и наоборот в 17:00, что определяется горным рельефом и существенным затенением в указанные периоды времени. Аналогичное распределение распространяется на отраженную и поглощенную солнечную радиацию.

На обоих участках отмечается пространственно-временная неоднородность пропускания солнечной радиации пологом, при которой большая часть подкронового пространства находится в тени крон большую часть светового дня, при этом имея в каждой точке индивидуальный временной период с наибольшим пропусканием. Для пушистодубового леса наибольшее количество пропускаемой солнечной радиации характерно в 12:00, а в можжевелевом в 15:00. Также различия проявляются при распределении радиации в утреннее и вечернее время, в пушистодубовом лесу количество пропускаемой солнечной радиации в утреннее время преобладает над вечерним, в то время как в можжевелевом – в вечернее.

Распределение длинноволновой части радиационного баланса в пушистодубовом и можжевелевом лесу в течение суток так же разнится, в пушистодубовом лесу происходит постепенное изменение показателей, увеличение теплового и эффективного излучения подстилающей поверхности и уменьшения теплового излучения атмосферы, в то время как в можжевелевом сообществе выделяются периоды 12:00 и 15:00 как время с наибольшими значениями теплового и эффективного излучения подстилающей поверхности и наименьшими значениями теплового излучения атмосферы.

В обоих случаях, несмотря на кардинально отличающуюся форму и структуру лесного сообщества, отмечается отрицательный радиационный баланс подкронового пространства в рамках средних значений при наличии существенных просветов в кроне деревьев с положительным балансом. Данное распределение демонстрирует сложную организацию и протекание процессов распределения потоков вещества и энергии в пределах можжевелевого и пушистодубового лесов.

3.2. Результаты расчета теплового баланса

3.2.1. Тепловой баланс открытого участка в зоне пушистодубового леса

Тепловой баланс территории в целом зависит от климатических параметров и характера подстилающей поверхности. Основным характеризующим параметром является радиационный баланс, распределение которого в ландшафте определяет его состояние и формирует потоки тепла.

3.2.1.1. Радиационный баланс

Благодаря мониторинговым измерениям можно проследить основные тенденции изменения радиационного баланса и его распределения по нескольким сезонам, динамику в течение месяца и дня (рисунок 3.11).

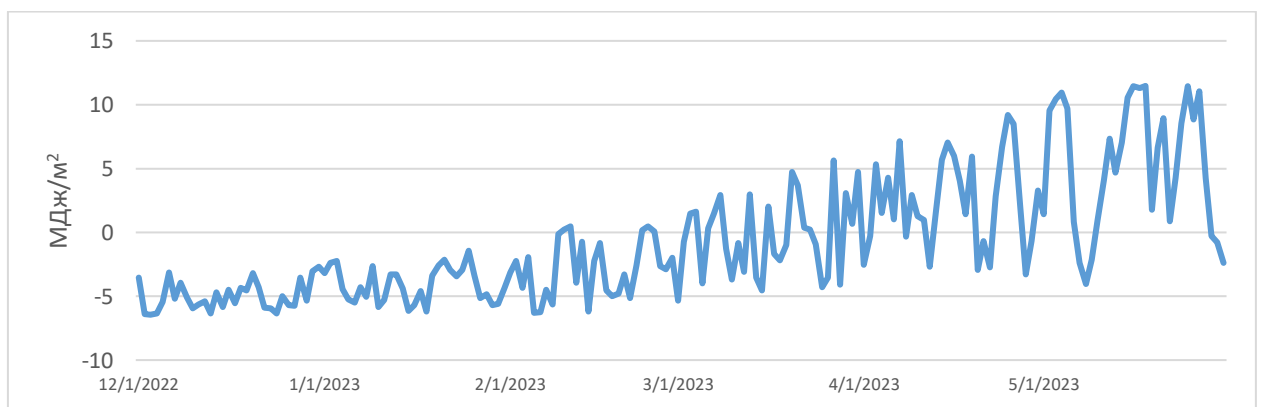


Рисунок 3.11 – Суточный радиационный баланс на открытом участке в период с 1 декабря 2022 г. по 31 июля 2023 г.

При рассмотрении суточных изменений значений радиационного баланса в зимний, весенний и летний период отмечаются закономерно положительные величины в дневное время и отрицательные в ночное (рисунок 3.12). Зимой в силу короткого светового дня и небольшого угла наклона солнца небольшие положительные значения баланса наблюдаются только на протяжении нескольких часов в период с 13 до 17 часов. С увеличением светового дня и положения солнца весной происходит существенный рост как

значений положительного радиационного баланса, так и его продолжительность, в летнее время значения также увеличиваются, а их изменения носит более плавный характер.

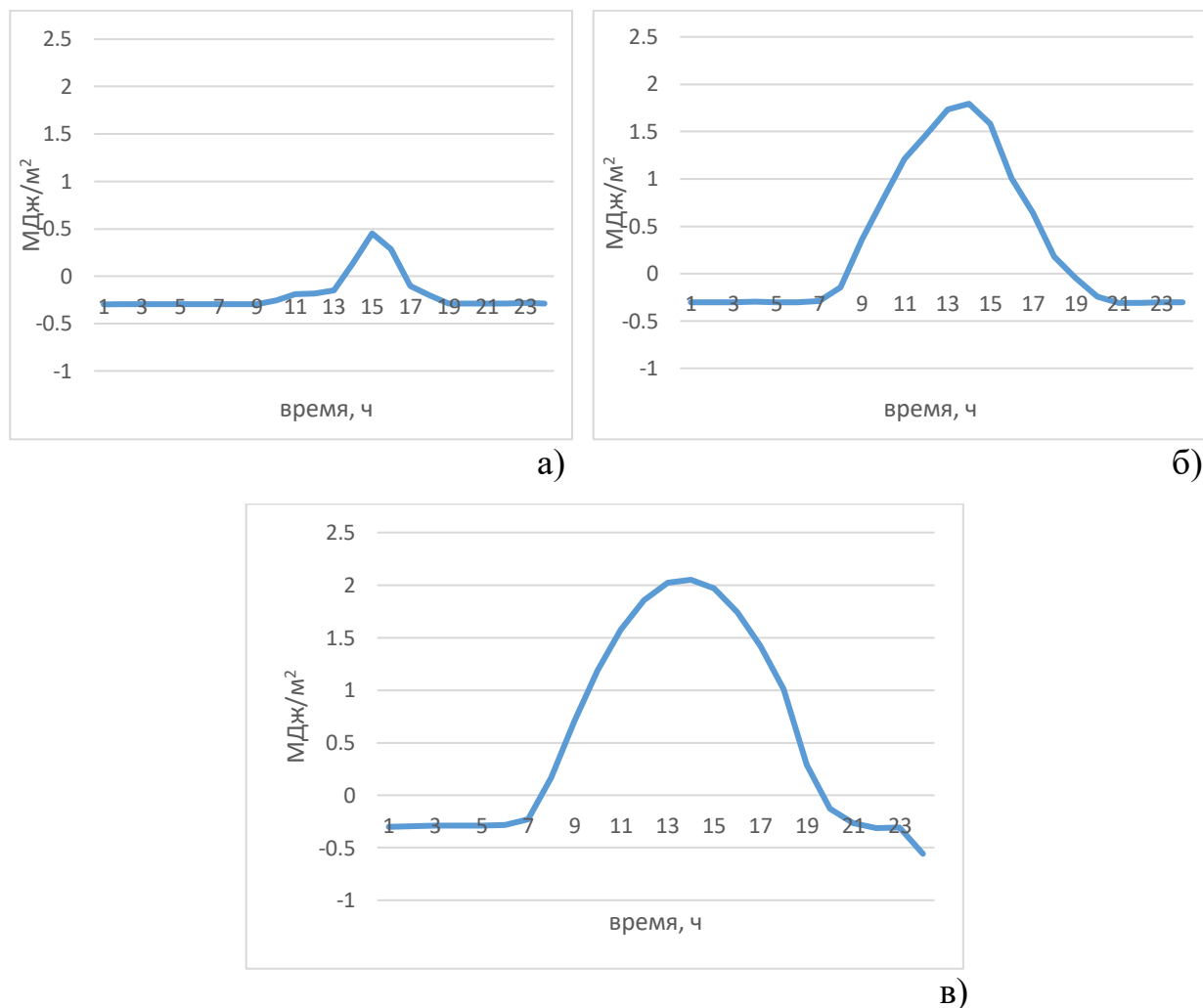


Рисунок 3.12 – Радиационный баланс открытого участка на примере: а) 17 января 2023 г.; б) 15 апреля 2023 г.; в) 6 июня 2023 г.

Согласно уравнению теплового баланса, происходит распределение значений радиационного баланса на перенос тепла и энергии внутри ландшафтной системы. Всего выделяют три основных направления преобразования энергии: затраты тепла на испарение, вертикальный турбулентный теплообмен и поток тепла в почвенном слое.

3.2.1.2. Затраты тепла на испарение

Явное тепло идет на турбулентный поток тепла в атмосфере и поток тепла в почве. Доля скрытого тепла приходится на затраты на испарение, она равна произведению скрытой теплоты испарения и величины испарения. При этом скрытая теплота испарения зависит от температуры испаряющей поверхности [29]. Для открытого участка характерны следующие колебания значений во времени (рисунок 3.13).

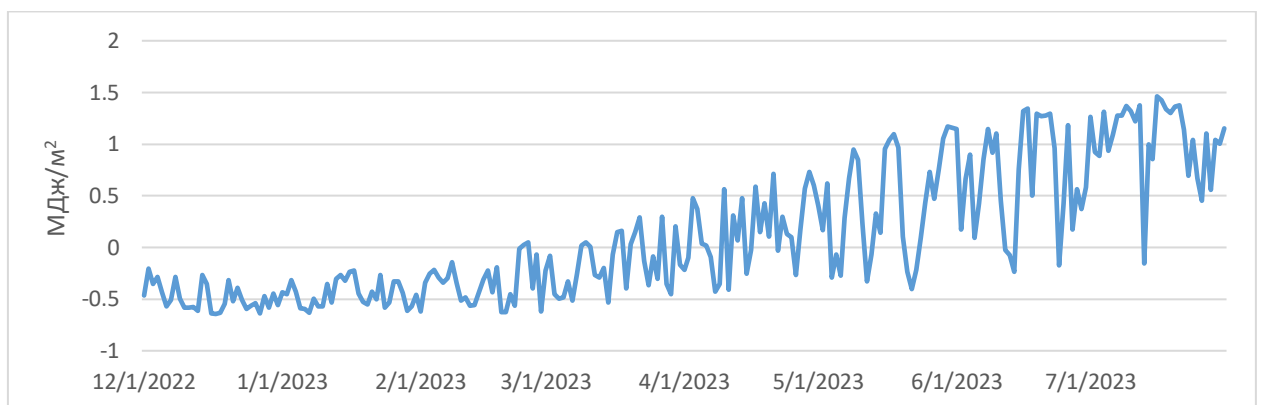


Рисунок 3.13 – Затраты тепла на испарение за сутки на открытом участке в период с 1 декабря 2022 г. по 31 июля 2023 г.

Аналогично радиационному балансу распределение значений затрат тепла на испарение неравномерное с постепенным увеличением в весенний период. В процентном соотношении затраты тепла на испарения к радиационному балансу имеют крайне неоднородный характер, отмечаются так же отрицательные значения, обозначающие противоположное направление потока тепла. В данном случае фиксируются затраты тепла на испарение при отрицательных значениях радиационного баланса в любое время суток. Так же в редких случаях отмечаются значения составляющие 10–60 % от значений радиационного баланса. В остальное время за редким исключением доля тепла затрачиваемая на испарение не превышает 1–5 %.

3.2.1.3. Турбулентный поток тепла

Турбулентный теплообмен подстилающей поверхности с атмосферой возникает за счет неодинакового прогрева подстилающей поверхности и прилегающего к нему слоя атмосферы. Характер его изменений аналогичен радиационному балансу и затратам тепла на испарение, происходят колебания значений с общим трендом на увеличение к летнему периоду (рисунок 3.14). По отношению к значениям радиационного баланса выделяются три ситуации. В первой при положительных значениях радиации фиксируются отрицательные значения турбулентного потока, демонстрирующие охлаждение, данная ситуация отмечается в период конец апреля – начало мая ранним утром. Вторая ситуация характеризуется значительным превышением значений турбулентного потока над радиацией 120–300 %, что наблюдается для отрицательных потоков, направленных на охлаждение, преимущественно в первой половине дня. Закономерности по сезонам и времени суток не наблюдается. Описанные выше две ситуации являются крайне редким явлением, и в третьей ситуации преобладающее количество значений турбулентного потока составляют около 90–100 % от радиационного баланса, что демонстрирует основное направление расходования поступающей в ландшафт энергии.

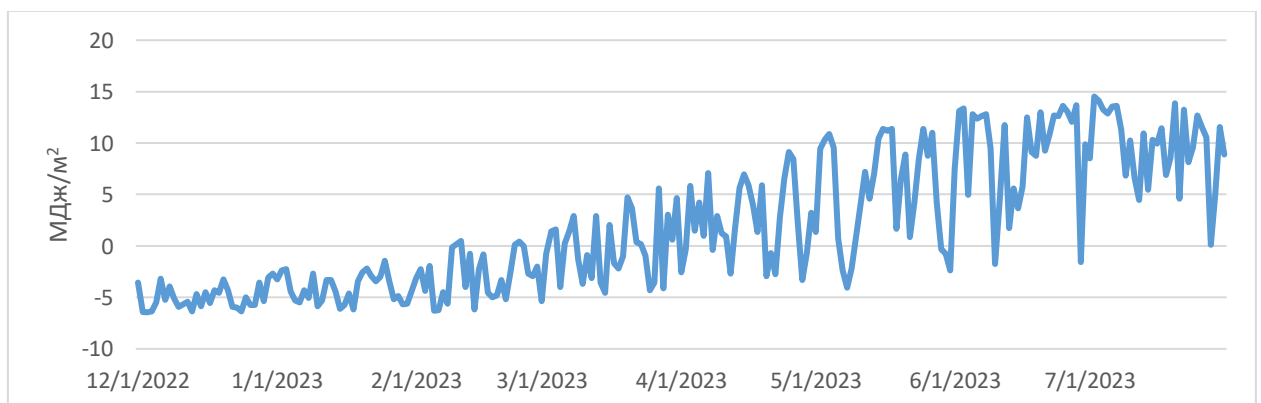


Рисунок 3.14 – Турбулентный поток тепла за сутки на открытом участке в период с 1 декабря 2022 г. по 31 июля 2023 г.

3.2.1.4. Поток тепла в почве

Поток тепла в почве характеризует изменение температуры почвы с глубиной. В отличие от остальных элементов теплового баланса не имеет тренда на общий рост значений, отмечается лишь попеременный нагрев и остывание почвенного слоя (рисунок 3.15). Противоположное значение по отношению к радиационному балансу поток тепла в почве принимает в ночное и утреннее время до полудня в зимний период, в марте время сдвигается на ранее утро с отрицательными значениями радиации и положительными потока в почве, и день с обратной ситуацией. Аналогично в весенне-летний период, однако он более стабилен по времени. Значения теплового потока крайне редко составляют более 40 % от значения радиационного баланса, в большинстве случаев их доля составляет не более 10 %.

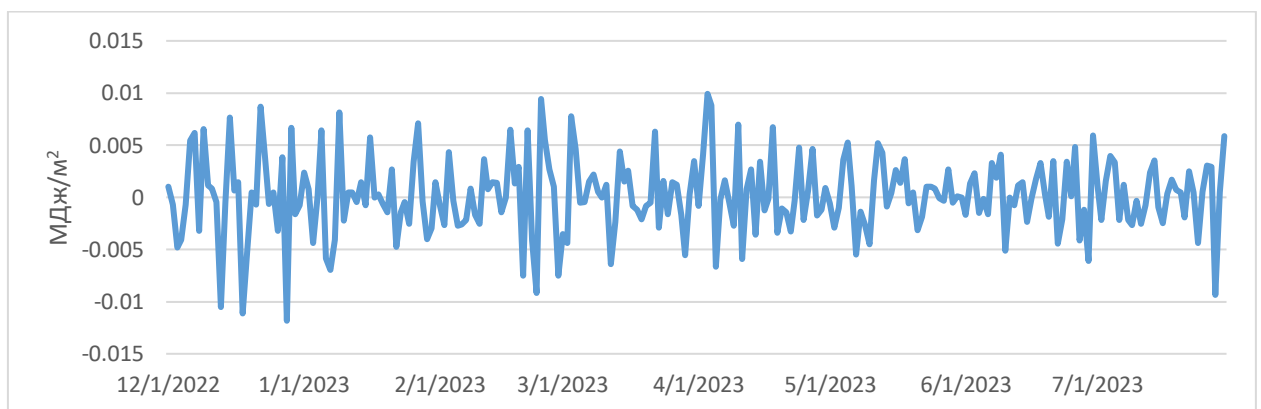


Рисунок 3.15 – Поток тепла в почве за сутки на открытом участке в период с 1 декабря 2022 г. по 31 июля 2023 г.

3.2.2. Тепловой баланс пушистодубового леса

Описанные выше значения элементов теплового баланса относятся к открытому горизонтальному участку без учета растительного покрова. Для пушистодубового леса, как леса с лиственными породами деревьев, характерно сезонное изменение количества листвы в кроне, вплоть до ее отсутствия в зимний период. Таким образом для рассматриваемого нами периода выделяются три фазы роста кроны для описания их состояния и

особенностей задержания ими поступающей радиации: отсутствие листвы в зимний период, начало вегетации в весенний период и состояние максимального развития кроны с конца весны и летом. Так как подпологовое пространство имеет сложную мозаичную структуру, и для каждой точки наблюдений характерны свои значения поступающей солнечной радиации, в расчетах использовались осредненные дневные значения пропускания для рассмотрения лесного сообщества в целом.

3.2.2.1. Радиационный баланс

Для зимнего периода среднее значение пропускания солнечной радиации пологом составляет 43,2 %. Данное значение характерно для всего зимнего периода и захватывает начало мая. При рассмотрении равнинного участка зимнего леса в ясную солнечную погоду фиксируются значения пропускания до 90 %, однако данные значения являются идеализированными и не учитывают особенности территории. Для изучаемой территории характерны частые туманы и облачность в зимний период, горный рельеф местности способствует формированию теней от склонов, а также на участке на некоторых ветвях деревьев отмечается не опавшая листва. Все перечисленные факторы влияют на количество поступления солнечной радиации под полог (рисунки 3.16, 3.17).

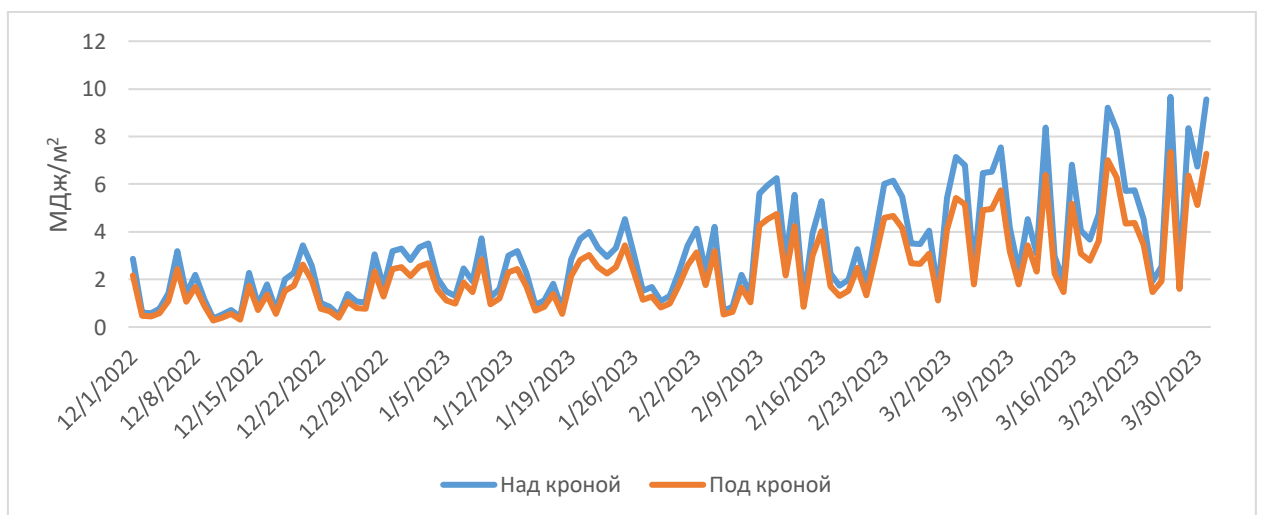


Рисунок 3.16 – Распределение суммарной солнечной радиации в период отсутствия листвы

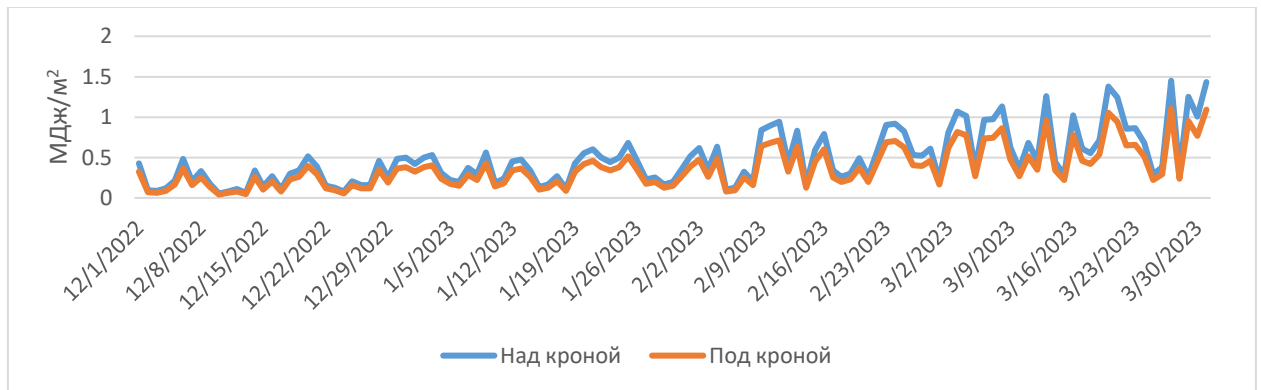


Рисунок 3.17 – Распределение отраженной солнечной радиации в период отсутствия листвы

Период начала вегетации протекает с марта по апрель, и значение пропускания солнечной радиации пологом составляет 45,6 % (рисунки 3.18, 3.19). Для большего временного периода данное значение составляет более 50 %, однако в вечернее время за счет теней, увеличенных из-за склона, оно значительно снижается. С мая и весь летний период крона находится в состоянии своего полного развития и пропускает в среднем только 19,1 % солнечной радиации (рисунки 3.20, 3.21). Завышенные значения отмечаются в полдень, а в остальное время значения пропускания ниже средних.

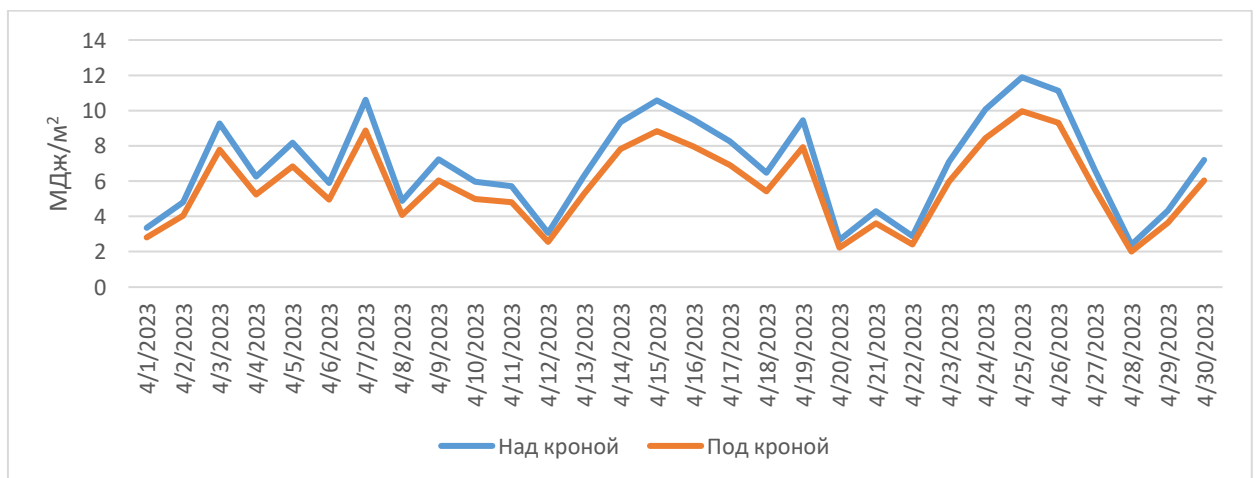


Рисунок 3.18 – Распределение суммарной солнечной радиации в период начала вегетации

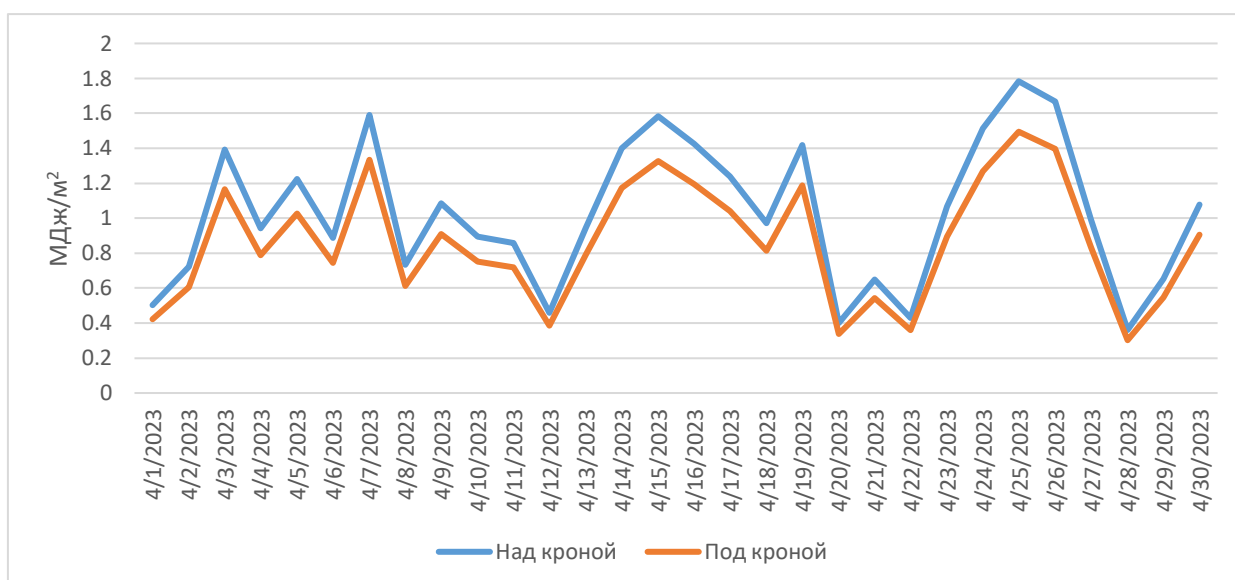


Рисунок 3.19 – Распределение отраженной солнечной радиации в период начала вегетации



Рисунок 3.20 – Распределение суммарной солнечной радиации в период полной вегетации

Данное распределение солнечной радиации между подпологовым пространством и поверхностью кроны определяет итоговые значения баланса под кроной, в котором в конце весны вместе с процессом развития кроны деревьев резко снижаются значения радиационного баланса (рисунок 3.22).



Рисунок 3.21 – Распределение отраженной солнечной радиации в период полной вегетации

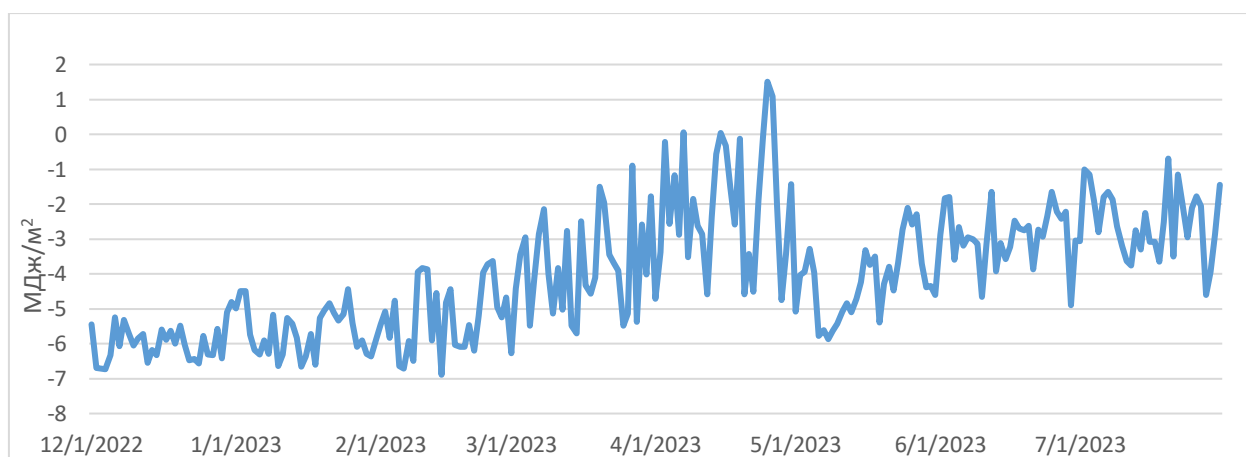


Рисунок 3.22 – Радиационный баланс за сутки под кроной в период с 1 декабря 2022 г. по 31 июля 2023 г.

На открытом участке вся суммарная солнечная радиация участвует в распределении потоков тепла, однако в лесном сообществе она делится на две области: над кроной и под кроной, которые формируют собственные потоки относительно независимо друг от друга.

3.2.2.2. Затраты тепла на испарение

При рассмотрении значений затрат тепла на испарение под кроной отмечаются отрицательные значения, демонстрирующие преобладание конденсации над испарением. Это объясняется характерной для зимнего периода пасмурной погодой и образованием тумана. В весенний период рассматриваемый показатель заметно возрастает (рисунок 3.23).

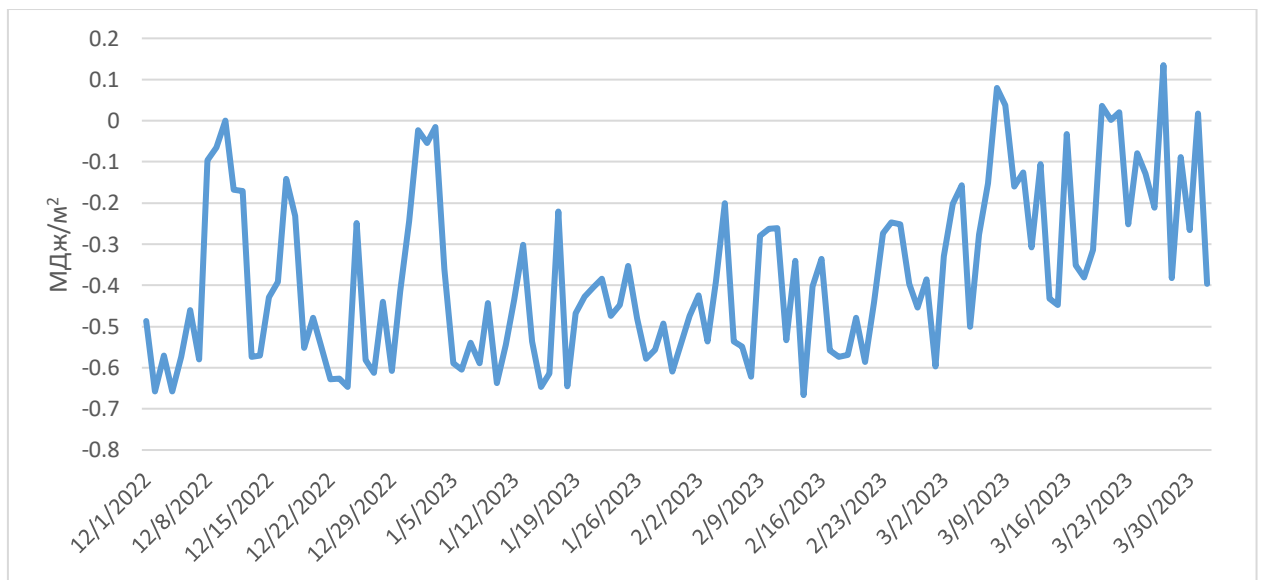


Рисунок 3.23 – Затраты тепла на испарение под кроной

В зимний период отмечается наибольшая амплитуда значений затрат тепла на испарения, которая составляет около $0,66 \text{ МДж/м}^2$ при перепадах значений от 0 до $-0,66 \text{ МДж/м}^2$. К концу зимы – началу весны амплитуда уменьшается до $0,45 \text{ МДж/м}^2$. В весенний период при увеличении показателя перепад значений сохраняется.

3.2.2.3. Турбулентный поток тепла

Аналогичная открытому участку в зоне произрастания пушистодубового леса ситуация наблюдается и при рассмотрении турбулентного потока тепла под пологом леса. Отрицательные значения турбулентного потока зимой постепенно возрастают к апрелю (рисунок 3.24).

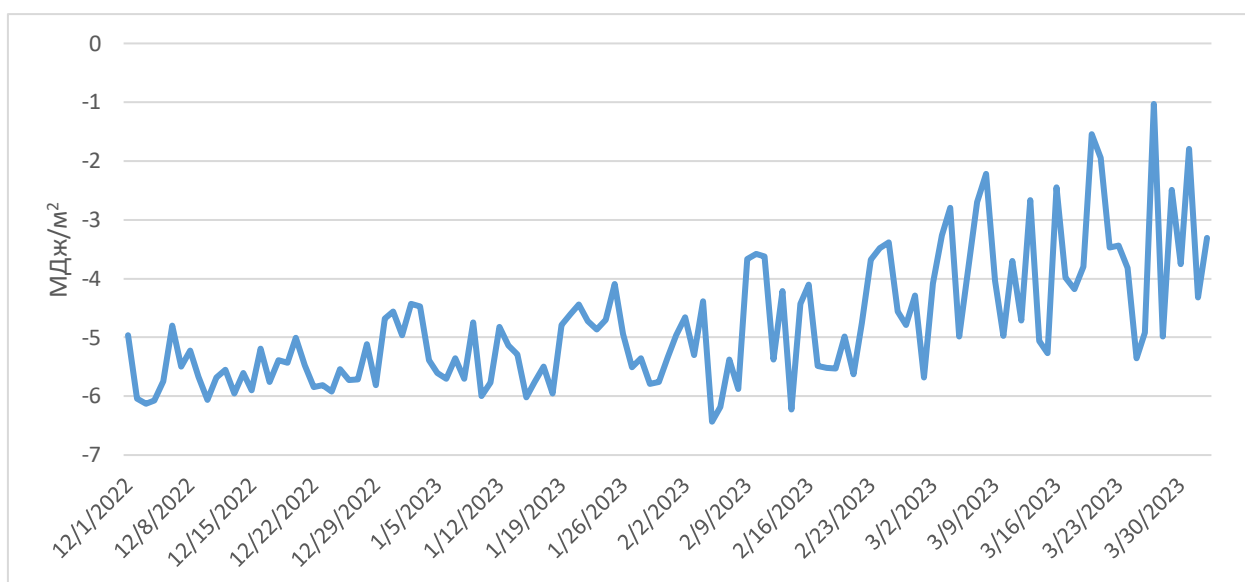


Рисунок 3.24 – Турбулентный поток тепла под кроной

В зимний период значения колеблются около $-5,5 \text{ МДж/м}^2$ и начинают возрастать к концу зимнего периода. В течение марта происходит заметное увеличение потока тепла и амплитуды его изменений.

3.2.2.4. Поток тепла в почве

Поток тепла в почве также, как и на открытом участке характеризуется равномерным чередованием нагрева и остывания слоя почвы в том же диапазоне значений (рисунок 3.25).

Не смотря на неполый ряд данных, на основании выявленных ранее закономерностей можно предположить ход дальнейшего изменения значений элементов теплового баланса. Поток тепла в почве аналогично открытому участку сохранит колебания значений около нуля с уменьшением их амплитуды в летний период. В тоже время затраты тепла на испарение и турбулентный поток тепла имеют аналогичный радиационному балансу характер изменения, что позволяет спрогнозировать их постепенный рост до мая и резкий спад значений при достижении кроной полного ее развития.

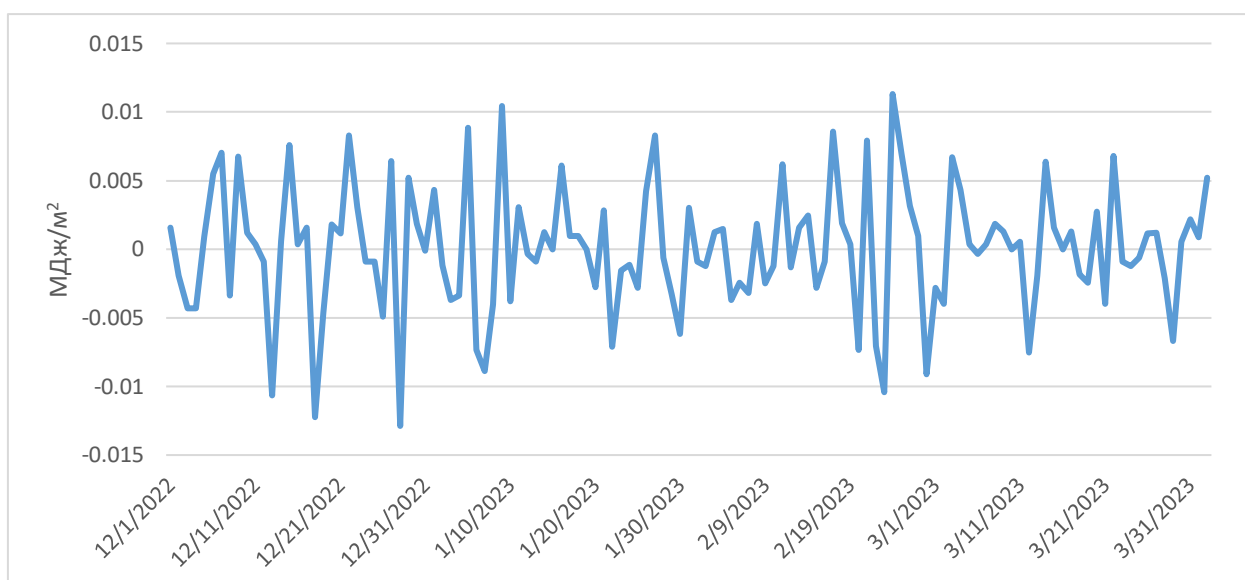


Рисунок 3.25 – Поток тепла в почве под кроной

3.2.2.5. Связь температуры воздуха с основными элементами теплового баланса

Стоит рассмотреть дополнительно изменение хода температуры как основной характеристики тепла на открытом участке и под пологом леса. Согласно рисункам 3.26 и 3.27, среднесуточная температура воздуха в лесу в рассматриваемый период всегда выше температуры на открытом участке. В зимний период разница не существенна, но с постепенным развитием кроны становится более заметным ее влияние на сохранение тепла в подпологовом пространстве. Летом ситуация аналогичная за счет сохранения накопленного днем тепла ночью и ранним утром, в отличие от открытого участка.

При рассмотрении изменения температуры в рамках суточных значений отмечается, что в зимний период превышение значений в лесу составляет около $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в полдень данное значение могло подниматься от $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ в отдельные часы. В марте ночная разница составляет $0,1\text{--}0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, в период 8–15 часов разница могла достигать $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в полдень максимальная разница достигала $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. В весенне-летний период в отдельные часы разница также могла достигать $4\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Превышение температуры воздуха на открытом участке над значениями в лесном сообществе зафиксированы на

протяжении всего рассматриваемого периода, как правило разница составляла не более 1 °С в ночное время и ранним утром.

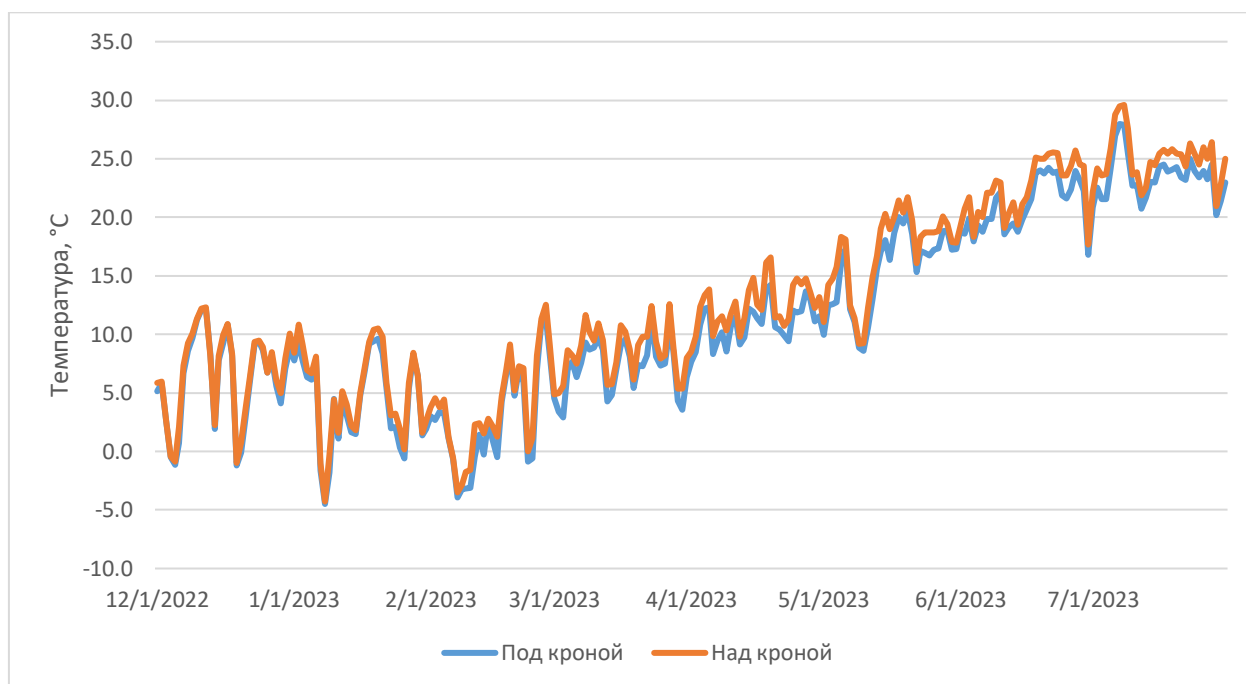


Рисунок 3.26 – Температура воздуха на открытом участке и под пологом пушистодубового леса

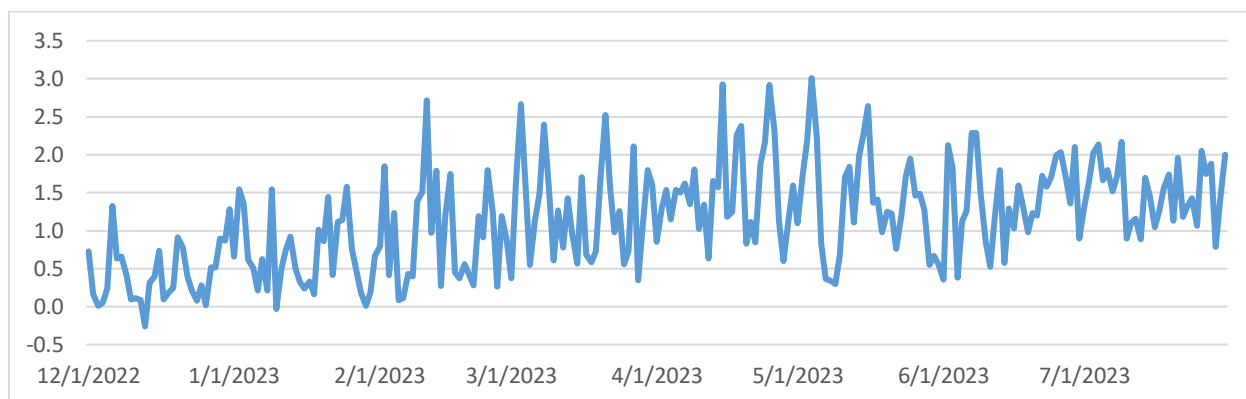


Рисунок 3.27 – Разница температур воздуха между открытым участком и под пологом пушистодубового леса

Среднесуточные значения температуры почвы демонстрируют сохранение тепла пологом леса в зимний период, в марте значения

выравниваются и с началом вегетационного периода отмечается снижение температуры в лесном участке (рисунок 3.28, 3.29).

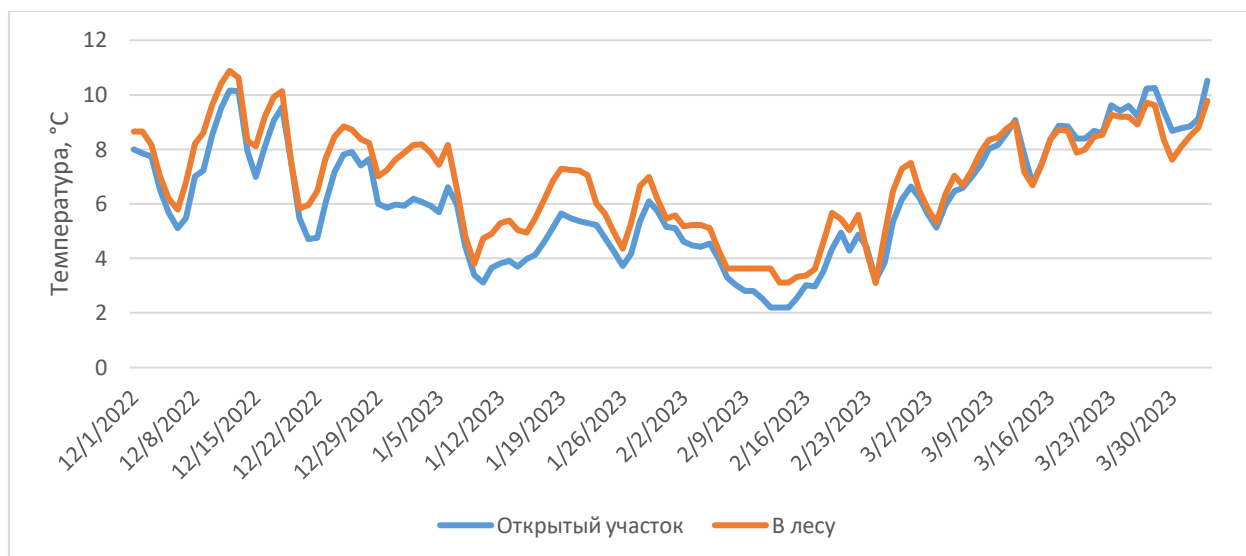


Рисунок 3.28 – Температура почвы на открытом участке и под пологом пушистодубового леса

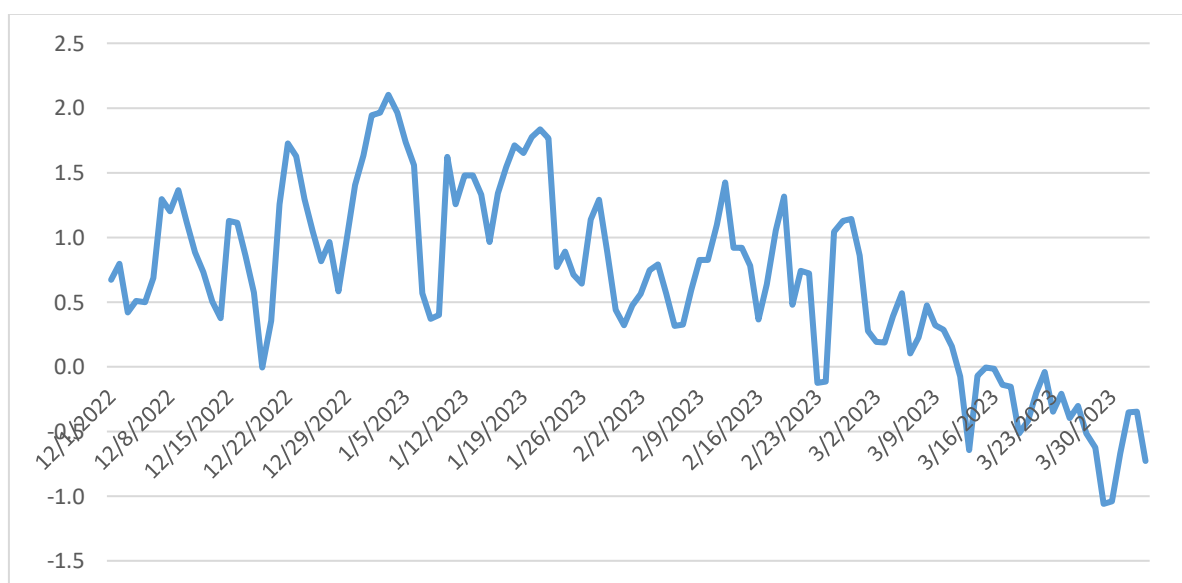


Рисунок 3.29 – Разница температур почвы под пологом пушистодубового леса и открытым участком

Разница температур почвы между открытым участком и лесом более равномерная по сравнению со значениями воздуха и не имеет резких перепадов. В зимний и весенний период в среднем разница составляет 1 °C,

максимум – 2,7 °С. В редких случаях в ночное время температура открытого участка может превышать значения в лесу около 0,2 °С.

В летний период, в условиях тени под кроной, температура почвы снижается и в ночное время имеет разницу с открытым участком 2–3 °С, а днем быть меньше на 7–8 °С.

При рассмотрении зависимости основных элементов теплового баланса от температуры наблюдается общая закономерность, при которой рост температуры фиксируется при увеличении значений радиационного баланса, затрат тепла на испарение и турбулентный обмен (рисунок 3.30–3.35). Для теплового потока в почве данная закономерность не наблюдается.

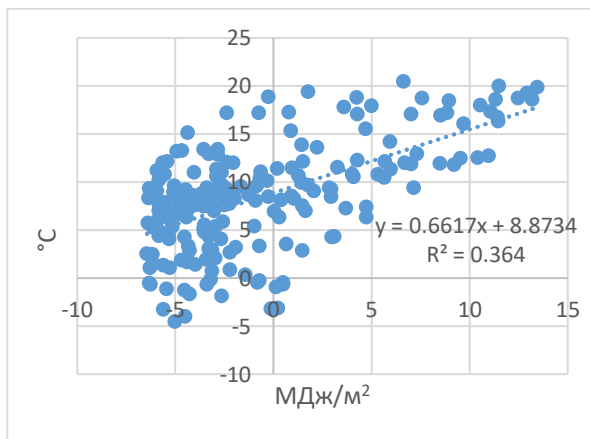


Рисунок 3.30 – Связь значений температуры воздуха и радиационного баланса на открытом участке

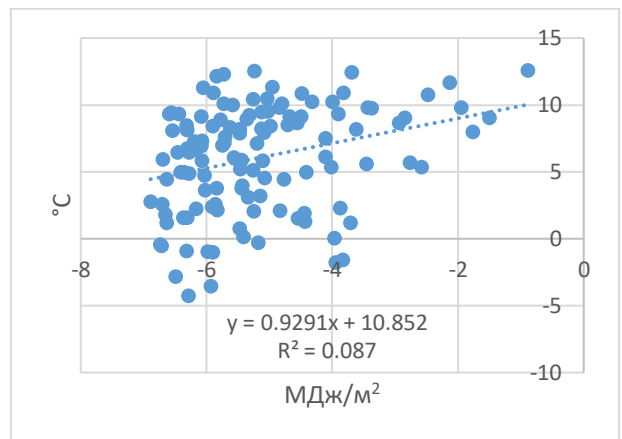


Рисунок 3.31 – Связь значений температуры воздуха и радиационного баланса под пологом леса

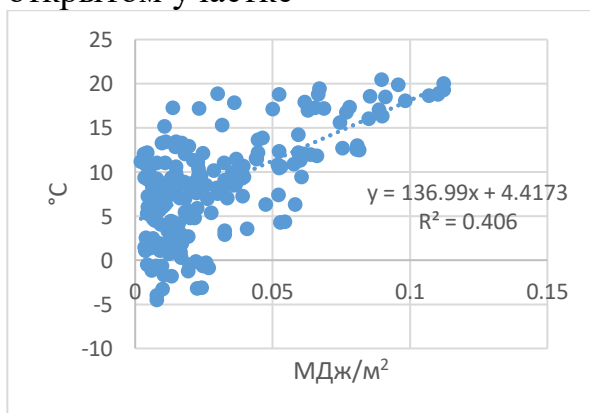


Рисунок 3.32 – Связь значений температуры воздуха и затрат тепла на испарение на открытом участке

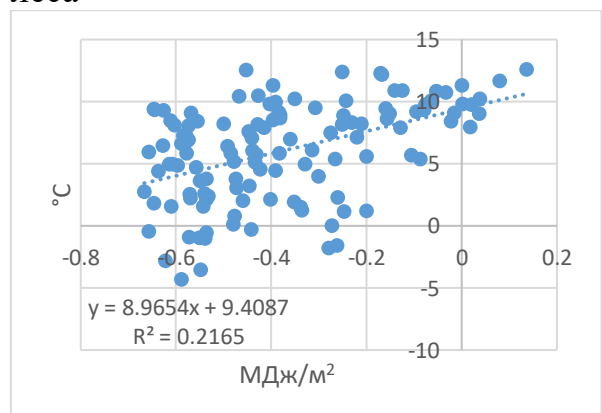


Рисунок 3.33 – Связь значений температуры воздуха и затрат тепла на испарение под пологом леса

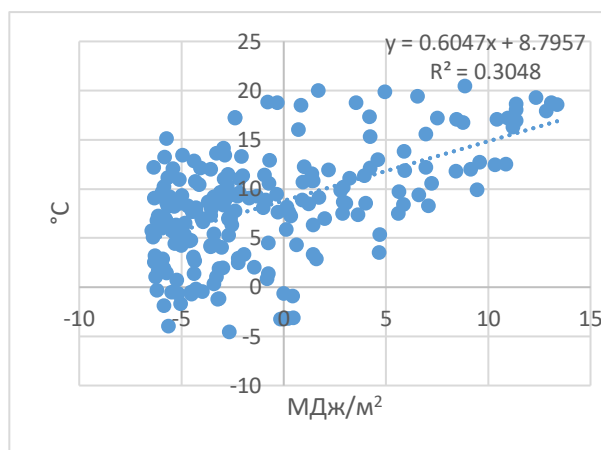


Рисунок 3.34 – Связь значений температуры воздуха и турбулентного потока на открытом участке

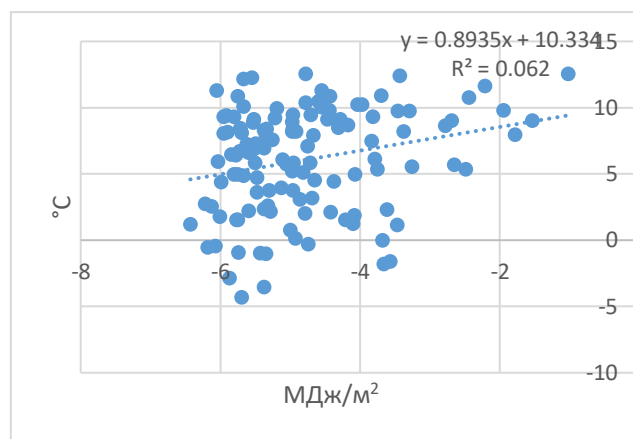


Рисунок 3.35 – Связь значений температуры воздуха и турбулентного потока под пологом леса

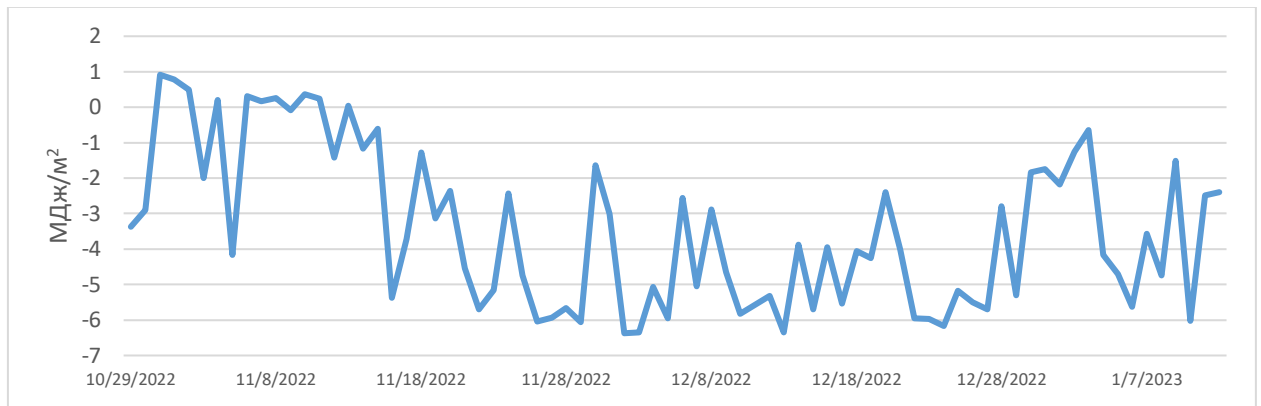
Несмотря на общую закономерность распределения значений на открытом участке и на территории пушистодубового леса, выделяется ситуация в лесу, где отношение температуры воздуха к основным элементам теплового баланса значительно слабее, чем на открытом участке. Это в свою очередь демонстрирует более сложную организацию рассматриваемого ландшафта и распределения в нем потоков тепла и энергии.

3.2.3. Тепловой баланс открытого участка в пределах можжевельного леса

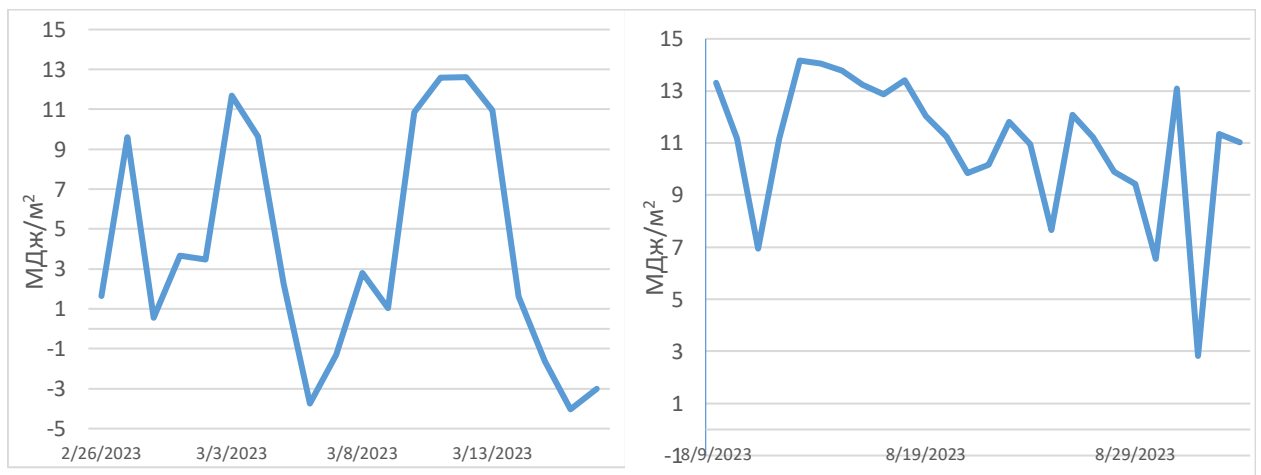
3.2.3.1. Радиационный баланс

Благодаря полученным в ходе мониторинговых измерений данным прослеживаются основные тенденции изменения радиационного баланса и его распределения по сезонам. В осенне-зимний период происходит постепенное уменьшение значений радиационного баланса (рисунок 3.36а). Осенью отмечаются попеременно положительные и отрицательные значения баланса, а зимой – только отрицательные. Обратно осенним, весенние изменения значений характеризуются постепенным увеличением положительных значений радиационного баланса (рисунок 3.36б). В летний период

наблюдаются стабильно высокие значения суточного баланса, который начинает уменьшаться к осеннему сезону (рисунок 3.36в).



а)



б)

в)

Рисунок 3.36 – Радиационный баланс за сутки на открытом участке; а) в осенне-зимний период с 29 октября 2022 г. по 13 января 2023 г.; б) в зимне-весенний период с 25 февраля по 18 марта 2023 г.; в) в летний период с 8 августа по 4 сентября 2023 г.

При рассмотрении суточных изменений значений радиационного баланса в зимний, весенний и летний период отмечаются закономерно положительные величины в дневное время и отрицательные в ночное (рисунок 3.37). В зимний период за счет короткого светового дня и небольшой высоты солнца над горизонтом наблюдается снижение положительных значений баланса, при этом в весенний период из-за частых туманов и облачности происходит значительное снижение поступления солнечной радиации. В

условиях ясного неба с увеличением светового дня и положения солнца весной происходит рост как значений положительного радиационного баланса, так и его продолжительность, максимальное количество поступления солнечной радиации происходит в летнее время.

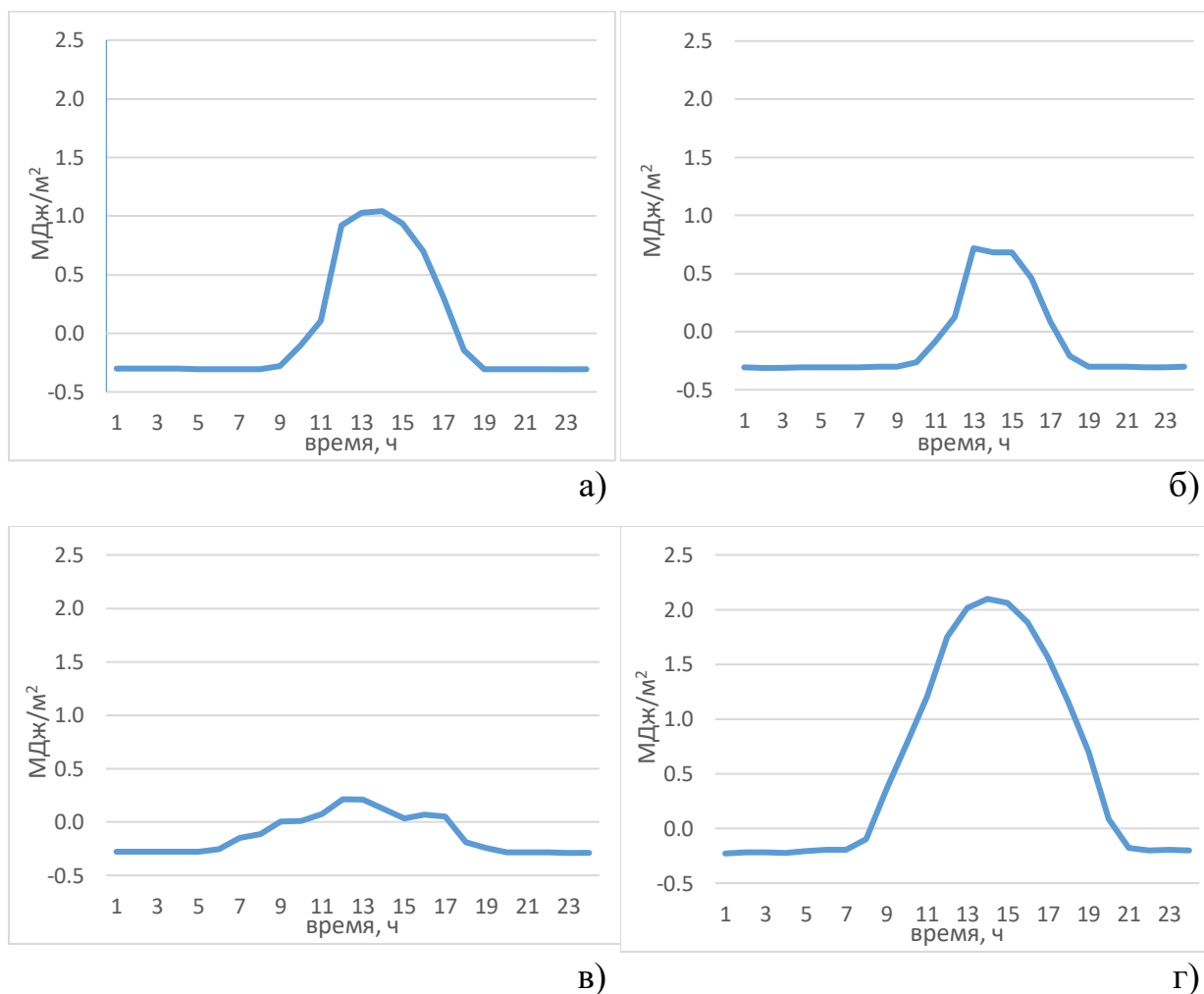


Рисунок 3.37 – Радиационный баланс открытого участка на примере: а) 8 ноября 2022 г.; б) 12 января 2023 г.; в) 18 марта 2023 г.; г) 9 августа 2023 г.

Дальнейшее распределение значений радиационного баланса на затраты тепла на испарение, вертикальный турбулентный теплообмен и поток тепла в почвенном слое формирует тепловой баланс внутри ландшафта.

3.2.3.2. Затраты тепла на испарение

Распределение значений затрат тепла на испарение происходит аналогично радиационному балансу (рисунок 3.38).

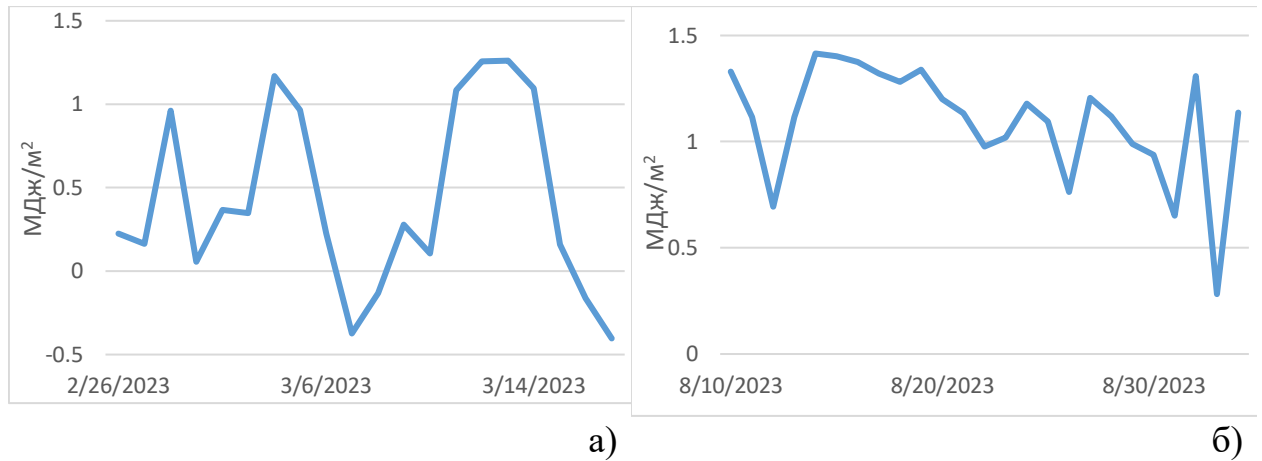


Рисунок 3.38 – Затраты тепла на испарение за сутки на открытом участке: а) в период с 25 февраля по 18 марта 2023 г.; б) в период 8 августа по 4 сентября 2023 г.

В соответствии с изменением поступления солнечной радиации, при ее увеличении с зимнего по летний период, происходит увеличение расхода энергии на испарение. В процентном соотношении затраты тепла на испарения к радиационному балансу составляют около 10 % с небольшими колебаниями. На исследуемой территории отрицательные значения радиационного баланса всегда соответствуют процессу конденсации, а положительные испарению.

3.2.3.3. Турбулентный поток тепла

Неравномерный прогрев подстилающей поверхности и прилегающего к нему слоя атмосферы образует турбулентный теплообмен. Характер его изменений аналогичен радиационному балансу и затратам тепла на испарение, неравномерные значение с общим трендом на увеличение с зимнего по летний период и уменьшение осенью (рисунок 3.39). Преобладающее количество значений турбулентного потока составляют около 90 % от радиационного

баланса, как основное направление расходования поступающей в ландшафт энергии.

При рассмотрении зимне-весеннего периода отмечается увеличение значений турбулентного потока тепла с увеличением разброса значений при сохранении среднего значения около 5 МДж/м². В летний период фиксируются стабильно высокие значения около 10 МДж/м² с небольшим уменьшением к осеннему периоду.

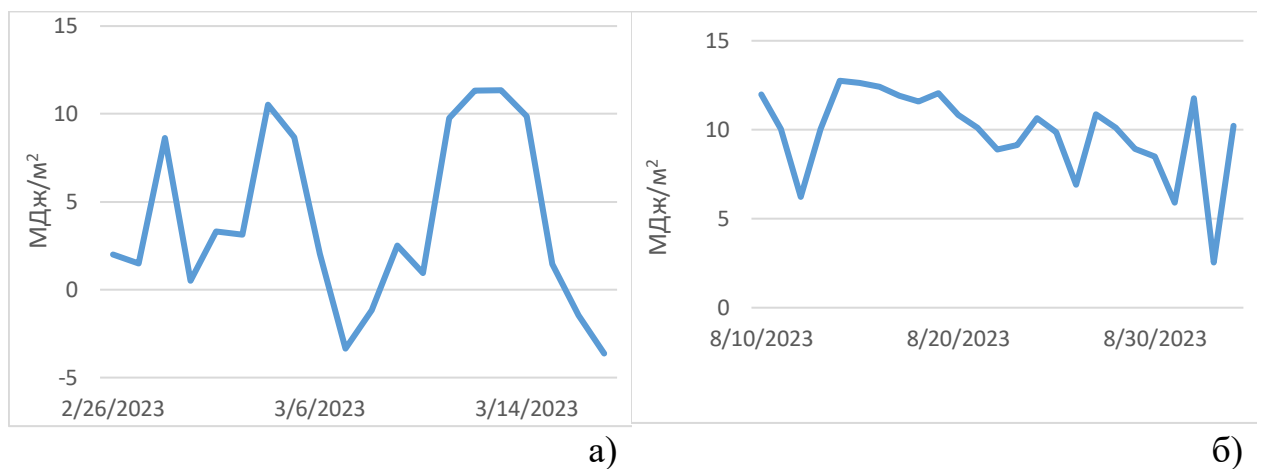


Рисунок 3.39 – Турбулентный поток тепла за сутки на открытом участке: а) в период с 25 февраля по 18 марта 2023 г.; б) в период с 8 августа по 4 сентября 2023 г.

3.2.3.4. Поток тепла в почве

Поток тепла в почве в отличие от остальных элементов теплового баланса не имеет четкого тренда на увеличение или снижение при смене сезонов, происходит только попеременный нагрев и остывание почвенного слоя (рисунок 3.40). В утреннее время поток тепла в почве обычно принимает противоположное значение по отношению к радиационному балансу. По отношению к радиационному балансу доля теплового потока в почве в большинстве случаев составляет около 1 %, за редким исключением достигая 10 %.

Аналогично участку в пушистодубовом лесу значения потока тепла в почве изменяются около нулевого значения с изменением перепадов значений в течение года.

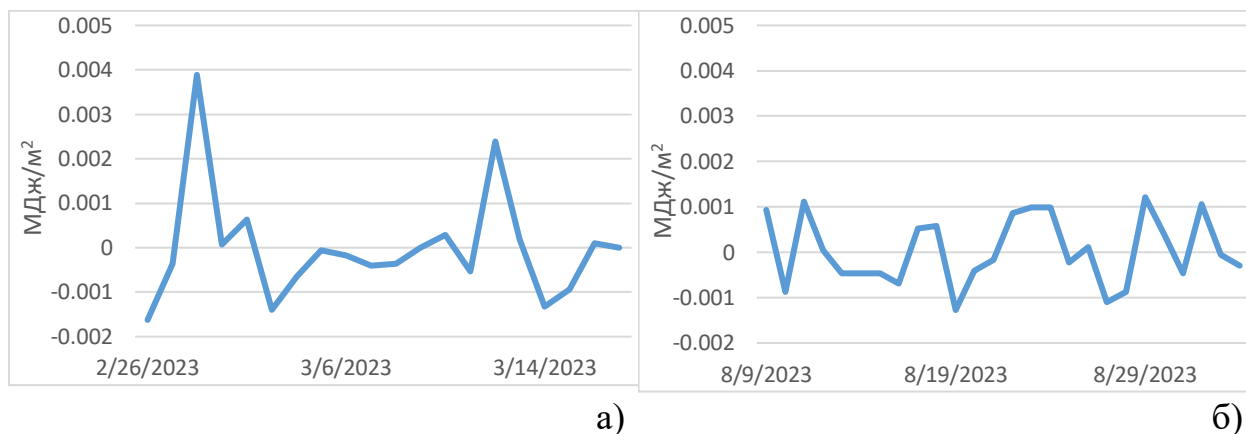


Рисунок 3.40 – Поток тепла в почве за сутки на открытом участке: а) в период с 25 февраля по 18 марта 2023 г.; б) в период с 8 августа по 4 сентября 2023 г.

3.2.4. Тепловой баланс можжевельного леса

Описанные выше значения элементов теплового баланса относятся к открытому горизонтальному участку без учета растительного покрова. Можжевельный лес, произрастающий на территории ключевого участка, формирует собственный кроновый рельеф, при этом для хвойных пород деревьев характерно постоянное состояние крон круглый год. Так же на рассматриваемом участке точечно встречаются лиственные породы, которые имеют сезонные изменения количества листвы в кроне. Таким образом, основными факторами, в равной степени влияющими на поступление солнечной радиации, являются положение солнца относительно поверхности, особенности рельефа, формирующие дополнительные теневые участки, и изменение состояния крон лиственных пород.

3.2.4.1. Радиационный баланс

Для зимнего периода среднее значение пропускания солнечной радиации пологом составляет 30,4 %. В отличие от лиственного леса можжевельный не имеет цельного сомкнутого полога, каждое дерево по отдельности формирует теневые участки, что в совокупности с горным рельефом местности создает сложный теневой рисунок, сильно изменяющийся во времени. Все перечисленные факторы влияют на количество поступления солнечной радиации под полог (рисунки 3.41, 3.42).

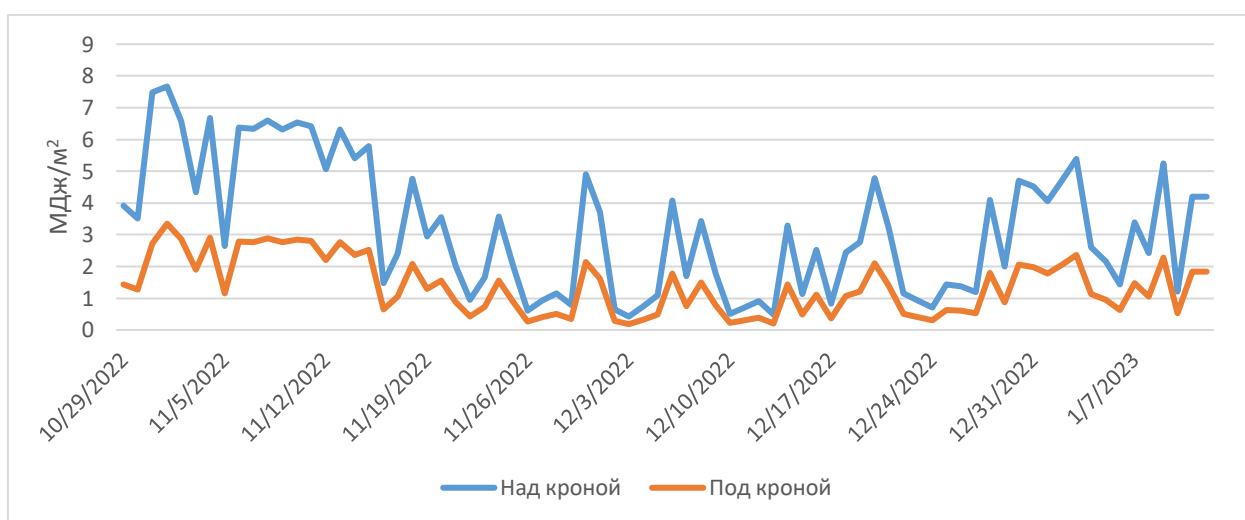


Рисунок 3.41 – Распределение суммарной солнечной радиации в осенне-зимний период

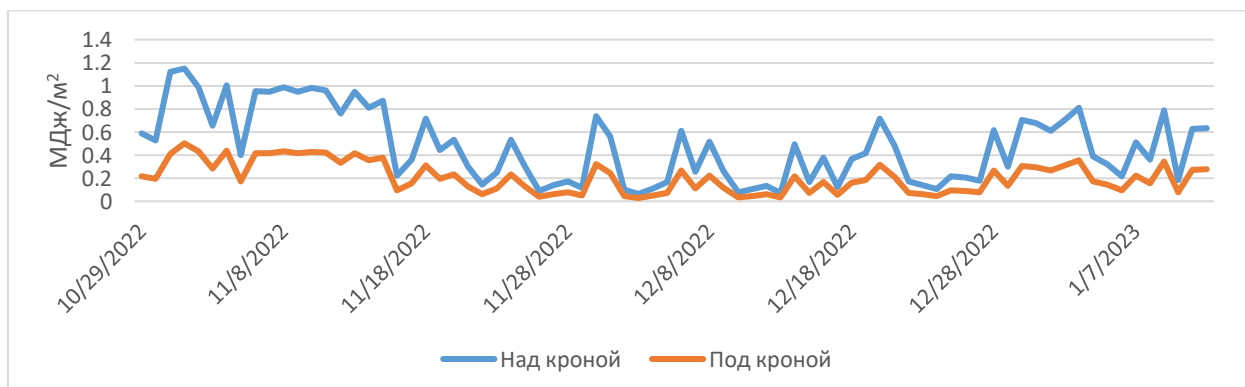


Рисунок 3.42 – Распределение отраженной солнечной радиации в осенне-зимний период

Период начала вегетации лиственных пород протекает с марта по апрель, при этом доля пропускания сохраняет крайне неравномерный характер распределения по площади. В среднем значение пропускания солнечной радиации пологом в весенний период составляет 26,7 % (рисунки 3.43, 3.44). Существенное влияние в рассматриваемые сезоны оказывает тень от скал в утренние и вечерние часы, за счет чего происходит снижение доли поступающей солнечной радиации под полог.



Рисунок 3.43 – Распределение суммарной солнечной радиации в весенний период



Рисунок 3.44 – Распределение отраженной солнечной радиации в весенний период

В летний период наблюдается более стабильная картина пропускания, где большая часть измерений фиксирует значения пропускания около 10 % за редким исключением, в среднем только 18,6 % солнечной радиации поступает под крону (рисунки 3.45, 3.46). Завышенные значения отмечаются в каждый период наблюдений в зависимости от положения солнца к точке измерений.



Рисунок 3.45 – Распределение суммарной солнечной радиации в летний период

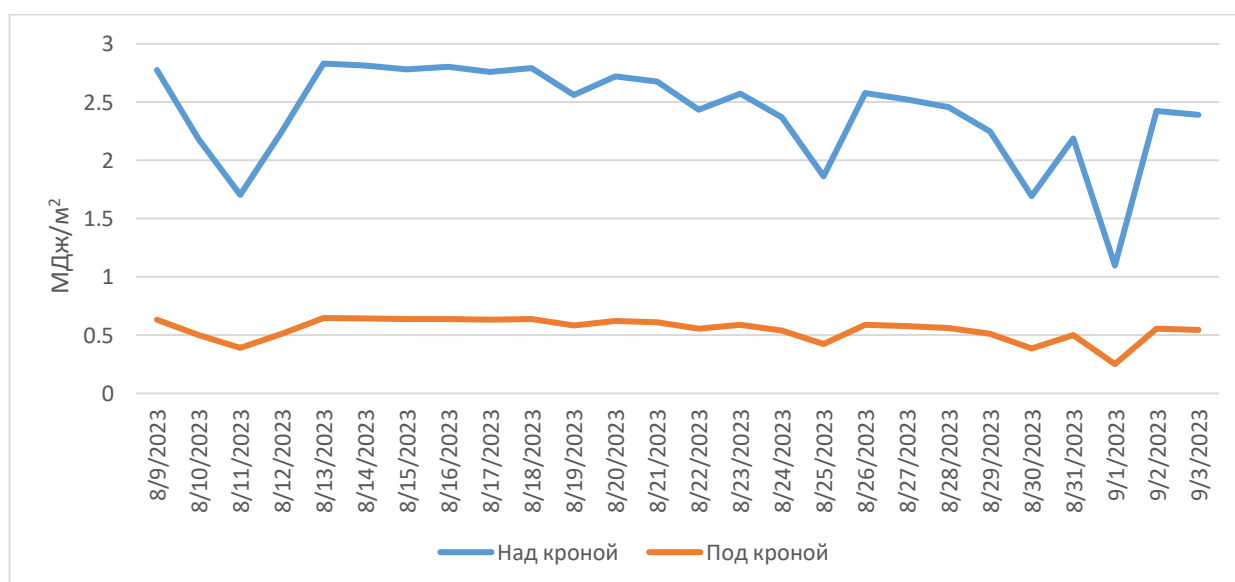


Рисунок 3.46 – Распределение отраженной солнечной радиации в летний период

Данное распределение солнечной радиации между подпологовым пространством и поверхностью кроны определяет итоговые значения баланса под кроной, в котором в течение всего года наблюдаются отрицательные значения (рисунок 3.47). Наименьшие значения закономерно наблюдаются зимой, переходный период с резкими перепадами весной, и относительно стабильные значения летом.

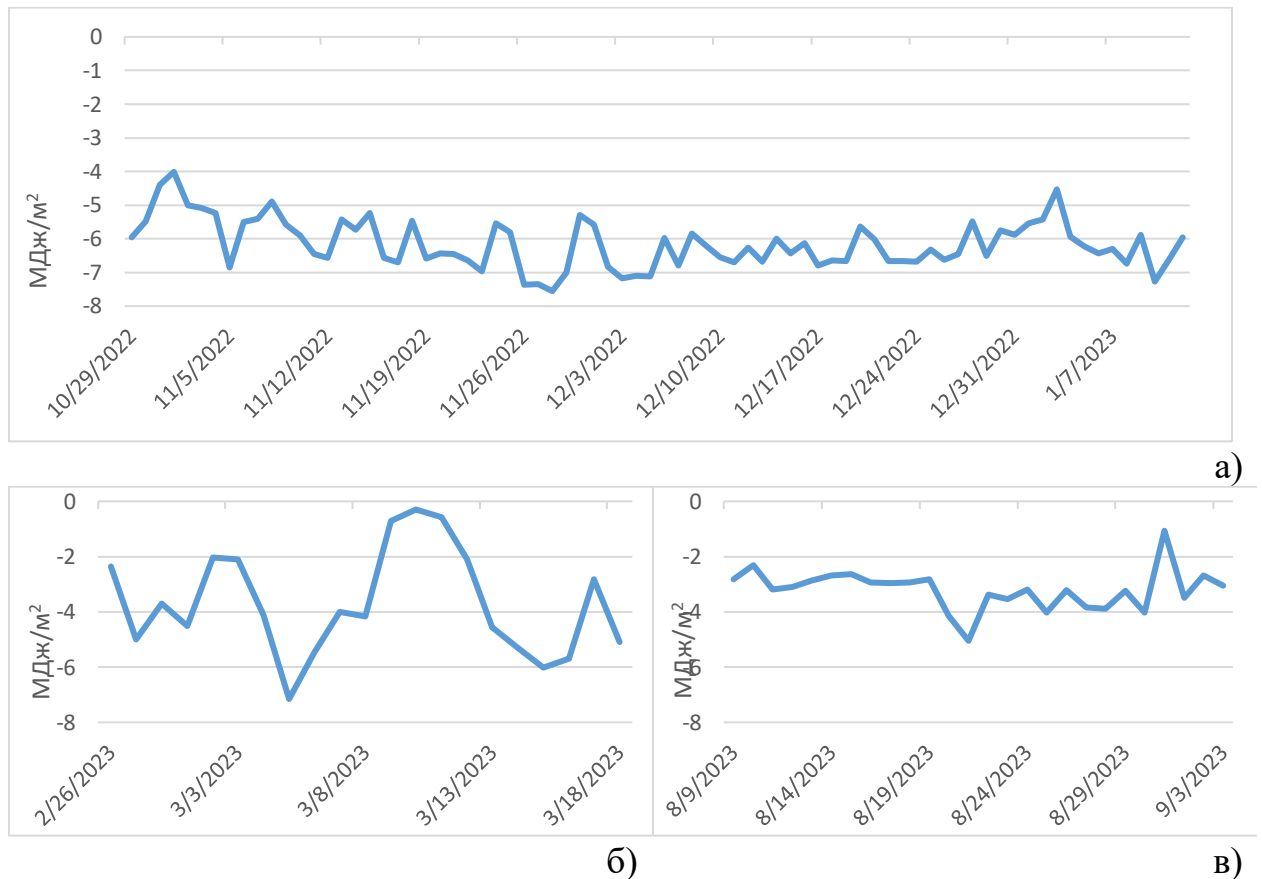


Рисунок 3.47 – Радиационный баланс за сутки под кроной: а) в осенне-зимний период; б) в весенний период; в) в летний период

3.2.4.2. Затраты тепла на испарение

При рассмотрении значений затрат тепла на испарение под кроной отмечаются отрицательные значения, демонстрирующие преобладание конденсации над испарением. Это объясняется характерной для весеннего периода пасмурной погодой и образованием тумана. Также стоит отметить прибрежное положение территории и наличие бризов, которые приносят воздушные массы, повышающие относительную влажность и понижающие

температуру, что оказывает влияние на расчетные значения испарения, снижая их. В летний период рассматриваемый показатель имеет более равномерный характер (рисунок 3.48).

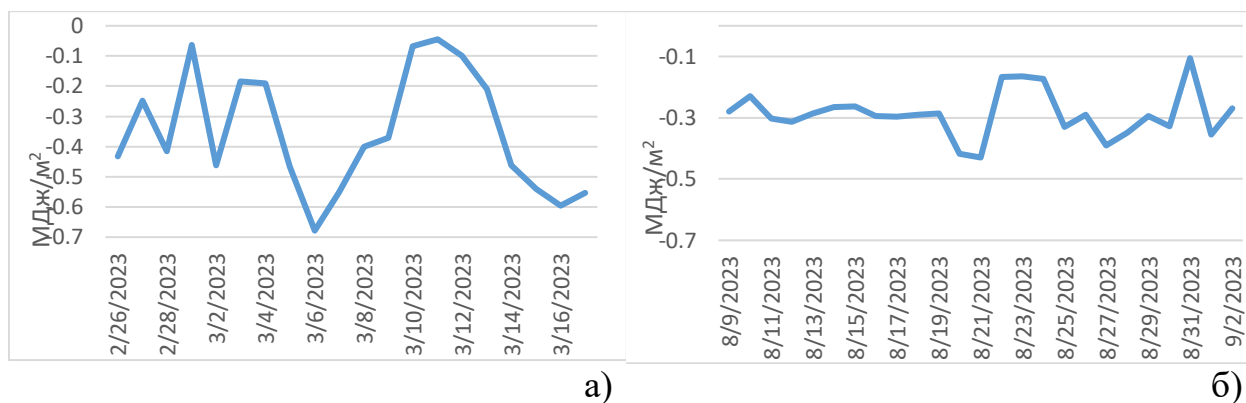


Рисунок 3.48 – Затраты тепла на испарение под кроной: а) в весенний период; б) в летний период

3.2.4.3. Турбулентный поток тепла

Аналогичная затратам тепла на испарение сохраняется характер изменения значений в соответствии с радиационным балансом. Происходит сглаживание амплитуды отрицательных значений с весеннего к летнему периоду (рисунок 3.49).

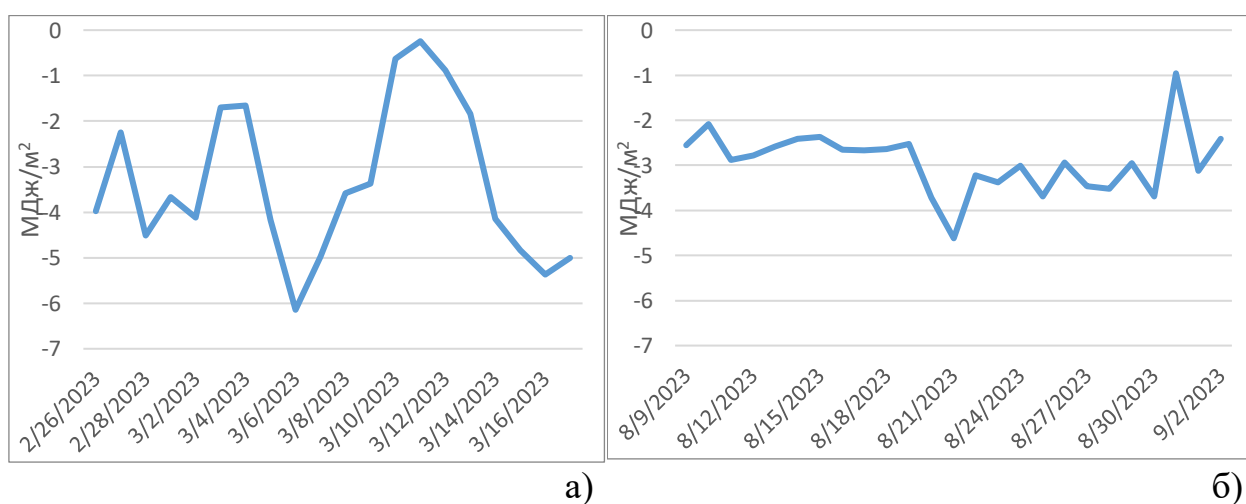


Рисунок 3.49 – Турбулентный поток тепла под кроной: а) в весенний период; б) в летний период

3.2.4.4. Поток тепла в почве

Поток тепла в почве так же, как и на открытом участке характеризуется попеременным нагревом и остыванием почвенного слоя в ограниченном диапазоне значений (рисунок 3.50).

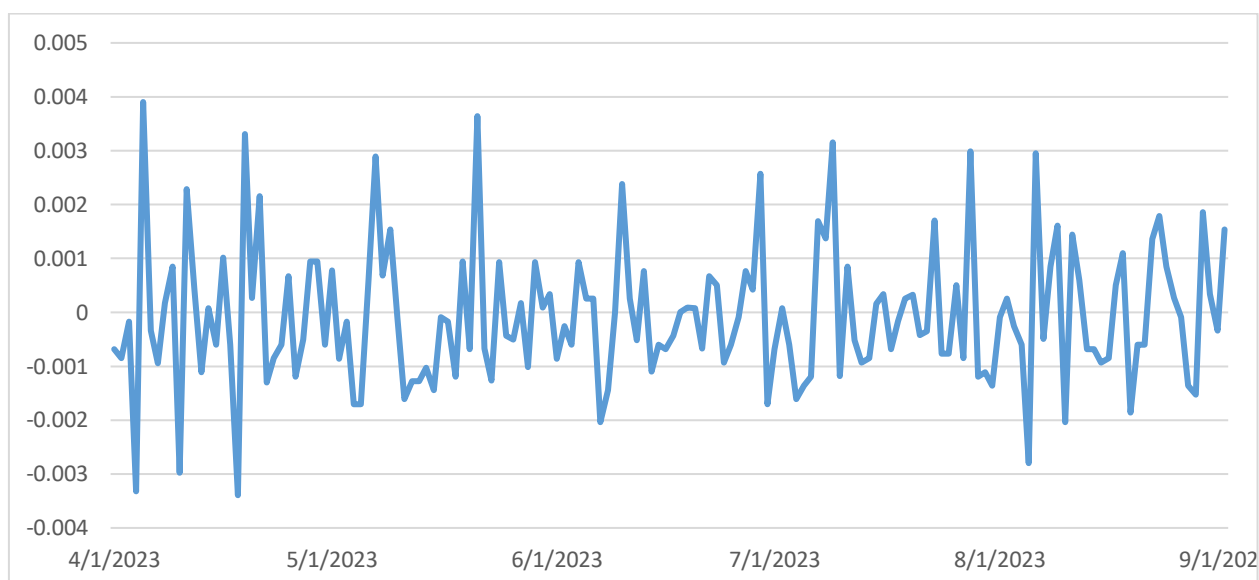


Рисунок 3.50 – Поток тепла в почве под кроной

Не смотря на неполный ряд данных, на основании выявленных ранее закономерностей можно предположить ход дальнейшего изменения значений элементов теплового баланса. Затраты тепла на испарение и турбулентный поток тепла характеризуются аналогичным радиационному балансу характером изменения. Для потока тепла в почве отмечаются колебания значений около нуля с уменьшением их амплитуды в летний период.

3.2.4.5. Связь температуры воздуха с основными элементами теплового баланса

При рассмотрении хода температуры как основной характеристики тепла на (рисунок 3.51) отмечается закономерный рост среднесуточной температуры воздуха с зимнего по летний период. Также в лесу в рассматриваемый период практически всегда выше температура воздуха чем

на открытом участке, что объясняется сохранением тепла в подпологовом пространстве и уменьшением суточного перепада температур.

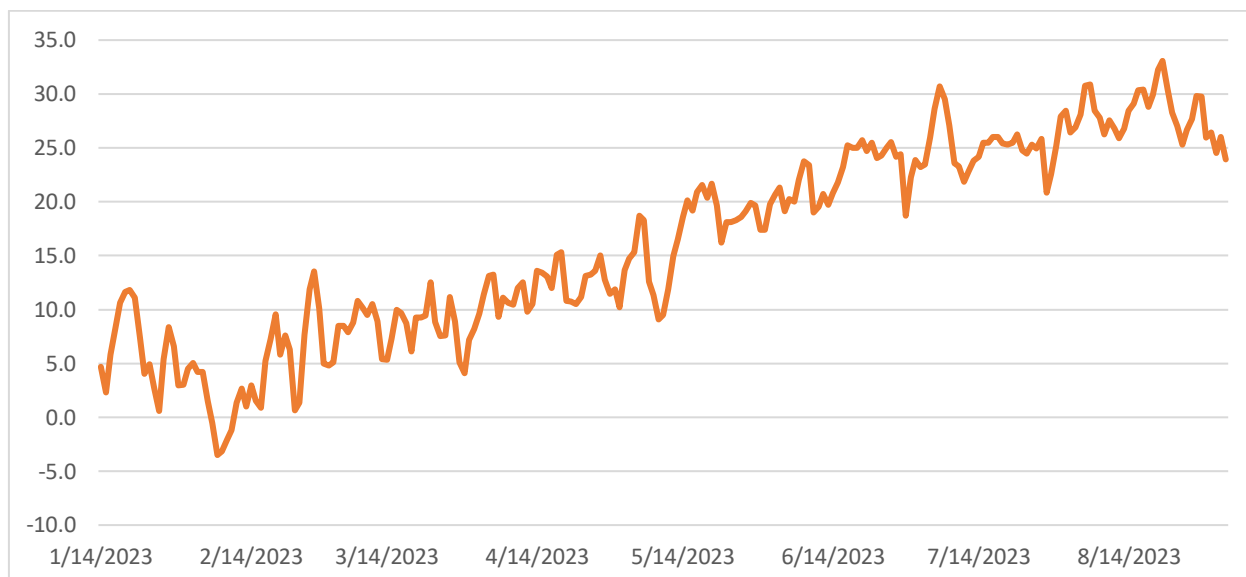


Рисунок 3.51 – Температура воздуха под пологом можжевельного леса

При рассмотрении изменения температуры в течение суток в зимне-весенний период превышение значений в лесу могут составлять до 4 °С, при этом в случае сильного охлаждения темпера воздуха за счет сильной затененности медленнее возрастает, чем на открытом участке. Таким образом возникают ситуации, при которых температура в лесу под пологом меньше, чем на открытом участке на 12 °С. В летний период разница температур имеет более стабильный характер и варьируется в пределах 1–2 °С.

Среднесуточные значения температуры почвы демонстрируют сохранение тепла пологом леса в зимний период, в марте значения выравниваются и с весеннего периода отмечается снижение температуры под пологом леса по отношению к открытому участку (рисунки 3.52, 3.53).

Разница температур почвы между открытым участком и лесом более равномерная по сравнению со значениями воздуха и не имеет резких перепадов. В зимний период в среднем разница составляет около 1 °С, максимум – 3 °С. В редких случаях температура открытого участка может

превышать значения в до 1,6 °С. Весной начинается превышение значений на открытом участке над значениями под пологом леса, в среднем превышение составляет 2,4 °С, максимум составляет 8,6 °С.

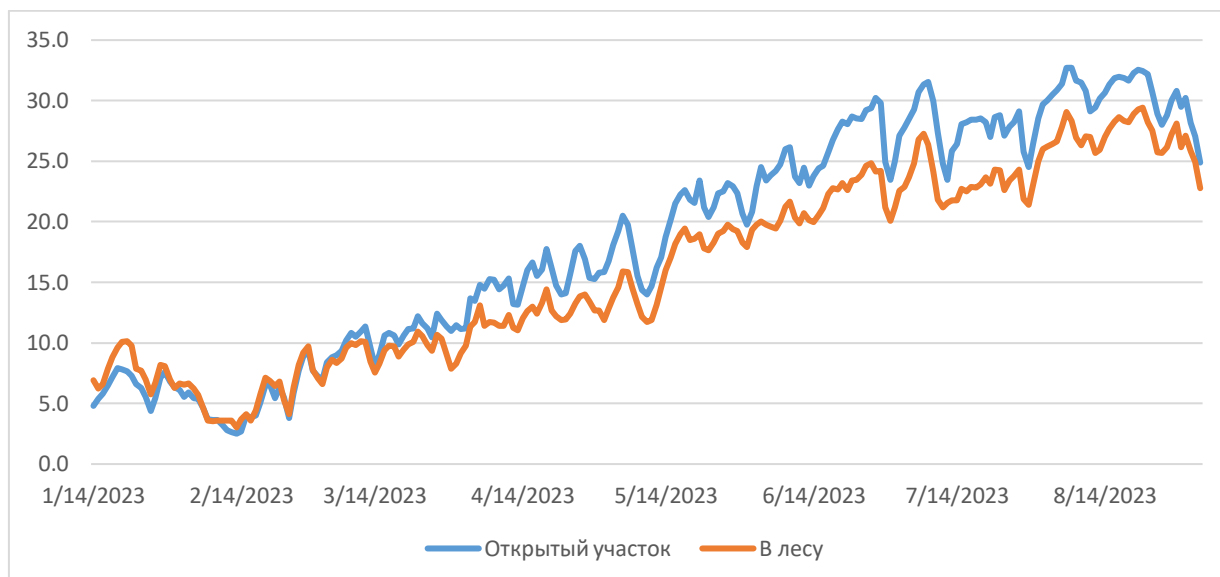


Рисунок 3.52 – Температура почвы на открытом участке и под пологом можжевельного леса

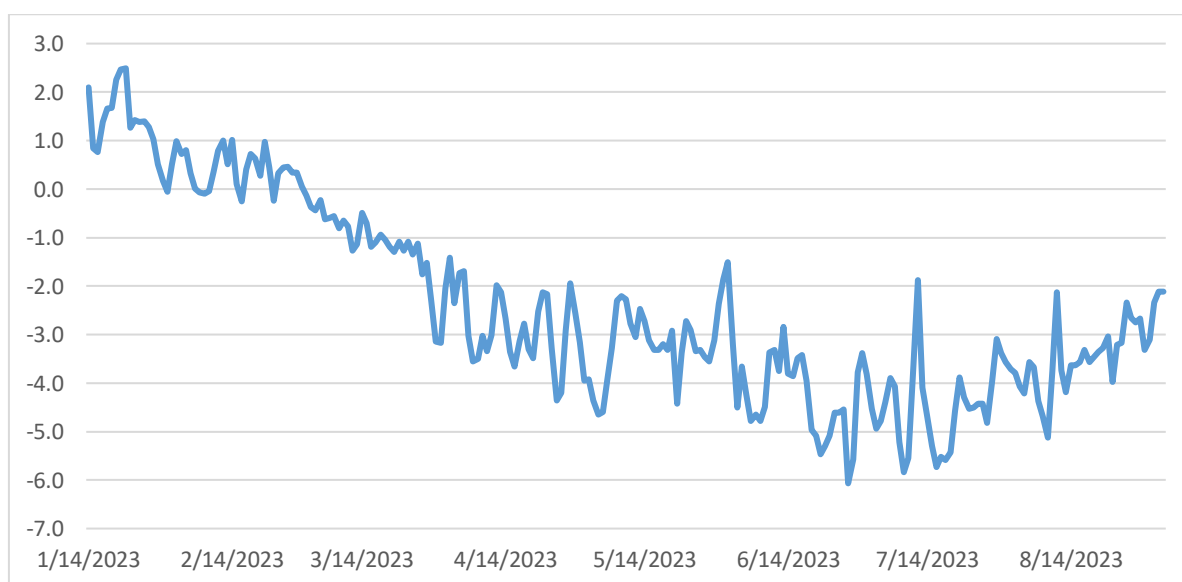


Рисунок 3.53 – Разница температур почвы под пологом можжевельного леса и открытым участком.

В летний период, в условиях тени под кроной, температура почвы снижается и в среднем имеет разницу с открытым участком до 4 °С, а максимальная разница составляет 9,6 °С.

Аналогично ситуации в пушистодубовом лесу при рассмотрении зависимости основных элементов теплового баланса от температуры наблюдается рост температуры при увеличении значений радиационного баланса, затрат тепла на испарение и турбулентного обмена (рисунки 3.54–3.56). Для теплового потока в почве данная закономерность не наблюдается.

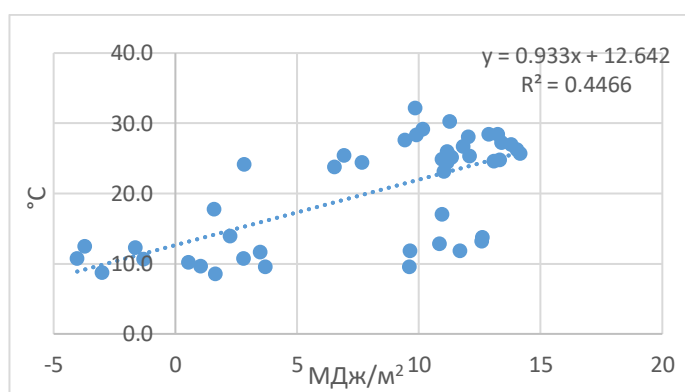


Рисунок 3.54 – Связь значений температуры воздуха и радиационного баланса на открытом участке

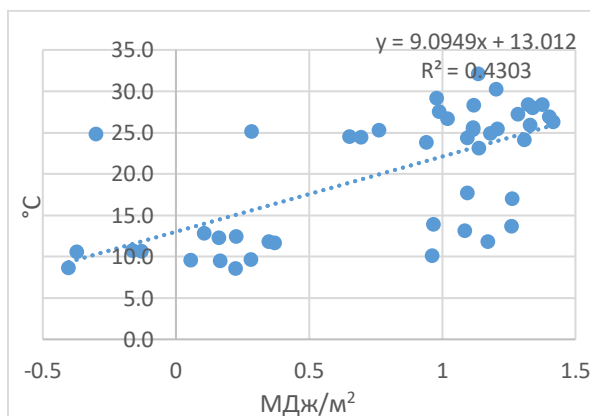


Рисунок 3.55 – Связь значений

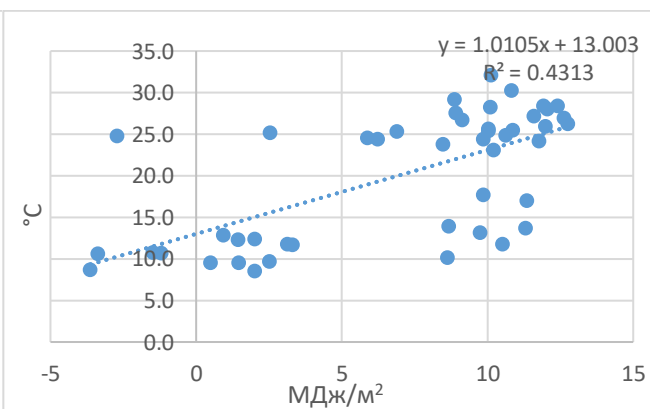


Рисунок 3.56 – Связь значений

температуры воздуха и затрат температуры воздуха и турбулентного тепла на испарение на открытом участке

Несмотря на общую закономерность распределения значений на открытом участке, в лесу отношение температуры воздуха к основным элементам теплового баланса значительно слабее.

3.2.5. Сравнительный анализ теплового баланса пушистодубового и можжевельного лесов

В пушистодубовых и можжевельных лесах прослеживается единая закономерность изменения значений суточного радиационного баланса на открытом участке. Основные различия формируются за счет разного характера растительности и особенностей рельефа. Так в можжевельном лесу с зимнего по летний период отмечается постепенное увеличение задержания кронами солнечной радиации, в то время как в пушистодубовом лесу на процесс постепенного развития кроны накладываются внешние факторы, такие как частая облачность и тень от хребта в зимне-осенний период, что в итоге дает относительно равные значения пропускания в зимний и весенний периоды с резким уменьшением значения пропускания в летний период. Данные условия определяют дальнейшее распределение значений элементов теплового баланса.

При рассмотрении радиационного баланса под кроной пушистодубового и можжевельного лесов отмечаются схожие значения на протяжении всего временного периода: около -6 МДж/м^2 зимой, около -3 МДж/м^2 с большим разбросом значений весной и небольшой амплитудой летом.

При рассмотрении значений затрат тепла на испарение под кроной отмечаются отрицательные значения, демонстрирующие преобладание конденсации над испарением. Это объясняется характерной для зимнего периода пасмурной погодой и образованием тумана. В весенний период рассматриваемый показатель заметно возрастает.

Затраты тепла на испарение под кроной в обоих сообществах характеризуются отрицательными значениями, однако в пушистодубовом сообществе происходит постепенный рост зимних значений к весенним в

среднем с $-0,5 \text{ МДж/м}^2$ до $-0,2 \text{ МДж/м}^2$, а в можжевеловом сообществе сохраняется среднее значение $-0,3 \text{ МДж/м}^2$ с изменением амплитуды перепадов значений.

Для турбулентного потока тепла сохраняется ситуация, аналогичная затратам тепла на испарение с ростом значений с $-5,5 \text{ МДж/м}^2$ до -3 МДж/м^2 в пушистодубовом лесу, и -3 МДж/м^2 – в можжевеловом.

Поток тепла в почве в пушистодубовом и можжевеловом лесах колеблется около нуля, основным отличием является амплитуда колебаний. В пушистодубовом лесу значения колеблются от $-0,013 \text{ МДж/м}^2$ до $0,012 \text{ МДж/м}^2$, а в можжевеловом от $-0,003 \text{ МДж/м}^2$ до $0,004 \text{ МДж/м}^2$.

На обоих рассматриваемых участках температура воздуха зимой на открытом участке меньше, чем под пологом леса, затем выравнивается в марте и становится на открытом участке больше, чем под пологом. Различия проявляются в разницах температур – зимой в пушистодубовом лесу она незначительна и колеблется около нуля, а весной и летом достигает до $2-3 \text{ }^\circ\text{C}$. В то же время в можжевеловом лесу летнее превышение температуры на открытом участке над лесом достигает до $6 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для температуры почвы характерны аналогичные изменения. На обоих участках в зимний период под пологом леса происходило сохранение тепла и значения температуры превышали измерения на открытом участке, выравнивание значений в марте, и снижение значение под пологом относительно открытого участка.

Связь значений температуры воздуха и элементов теплового баланса на открытом участке в среднем составляет $0,36$, что свидетельствует о непрямой взаимосвязи рассматриваемых параметров. В можжевеловом лесу коэффициент корреляции в среднем составляет $0,43$. Под пологом леса данный коэффициент значительно ниже, что демонстрирует более сложную систему взаимосвязей.

Данное распределение элементов теплового баланса демонстрирует сложную организацию и протекание процессов распределения потоков вещества и энергии в пределах можжевельового и пушистодубового леса.

3.3. Результаты расчета водного баланса

Водный баланс какой-либо территории зависит от климатических факторов и характера подстилающей поверхности. В литературе приводятся различные значения среднегодового количества осадков, выпадающих на территории Карадага. В среднем на Карадаге выпадает 357 мм осадков (за период с 1930 по 1980 гг.) [156], по другим данным – 389 мм осадков (за период с 1920 по 2006 гг.) [88], 501 мм осадков (за период с 2000 по 2011 гг.) и 467 мм осадков (за период с 2012 по 2018 гг.) по данным [75].

Согласно нашим наблюдениям, на территорию Карадага с 2010 по 2020 гг. выпадает в среднем 448 мм осадков. Это значительно меньше, чем в типичном Средиземноморье. В силу нахождения пушистодубовых лесов в Крыму на северно-восточном ареале своего существования, условия среды можно рассматривать как переходные от оптимальных к пессимальным. Например, в пределах пушистодубовых лесов, произрастающих примерно в 15 км к северу от Монпелье в южной Франции на высоте 250 м, среднегодовое количество выпадающих осадков составляет 1311 мм [237]. В Италии пушистодубовые леса получают примерно 850 мм осадков, а в районе города Эвора в Португалии – 665 мм [205].

В межгодовой динамике количества выпадающих осадков наблюдается большой диапазон значений – в 2020 г. в среднем на Карадаге выпало 275 мм осадков, а в 2010 г. – 715 мм, и, таким образом, амплитуда достигает 440 мм. В 2010–2020 гг. прослеживается тенденция на сокращение количества выпадающих осадков – 2019 и 2020 гг. характеризуются крайне низкими годовыми значениями.

Во внутригодовой динамике в пределах пушистодубовых лесов наблюдается постоянный зимний максимум осадков. В отдельные годы

(2013 г., 2014 г.) на исследуемой территории наблюдались абсолютные максимумы осадков в июне (45 % от годовой суммы осадков), носившие катастрофический характер для окружающей среды. Июль и август характеризуются стабильными засушливыми условиями – в среднем 31 мм. Зимний максимум характеризуется преобладанием или равномерным распределением осадков в течение поздней осени и зимних месяцев. Среднее количество выпадающих осадков в декабре – 45 мм, в январе – 48 мм, а в феврале – 33 мм. Весенние и осенние минимумы осадков характеризуются уменьшением количества выпадающих осадков – в среднем весной в пределах пушистодубовых лесов выпадает 27 мм осадков, а осенью – 34 мм.

В рамках исследований получены данные метеостанций, расположенных в зоне произрастания пушистодубового и можжевельного лесов. С их помощью можно проследить распределение количества осадков в течение года (рисунки 3.57-3.58) и их интенсивность.

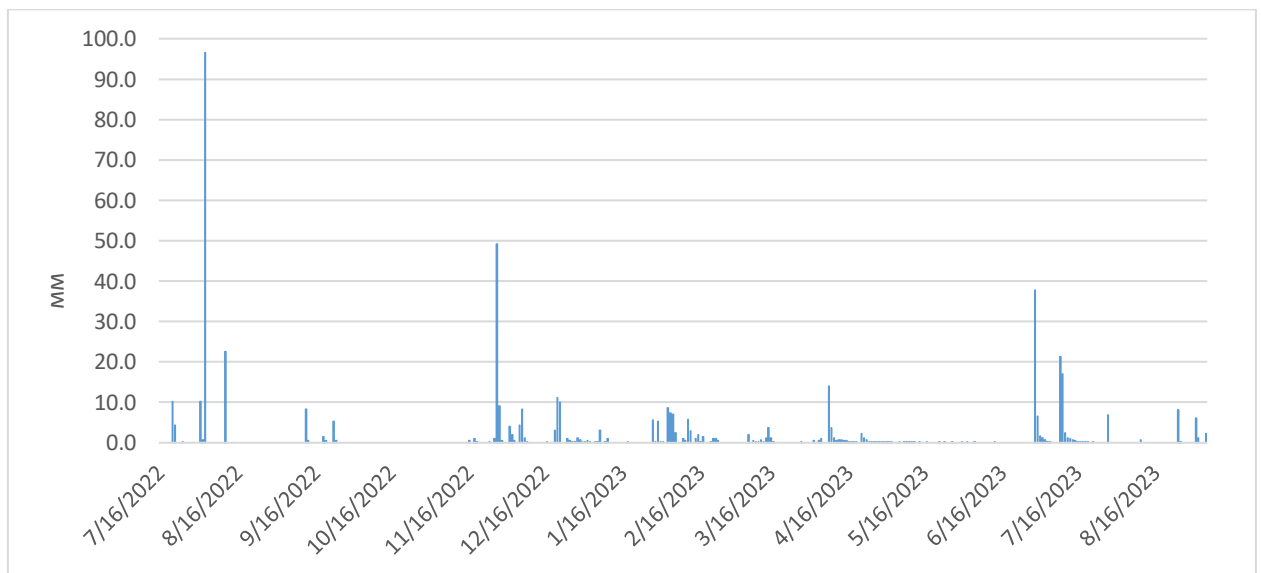
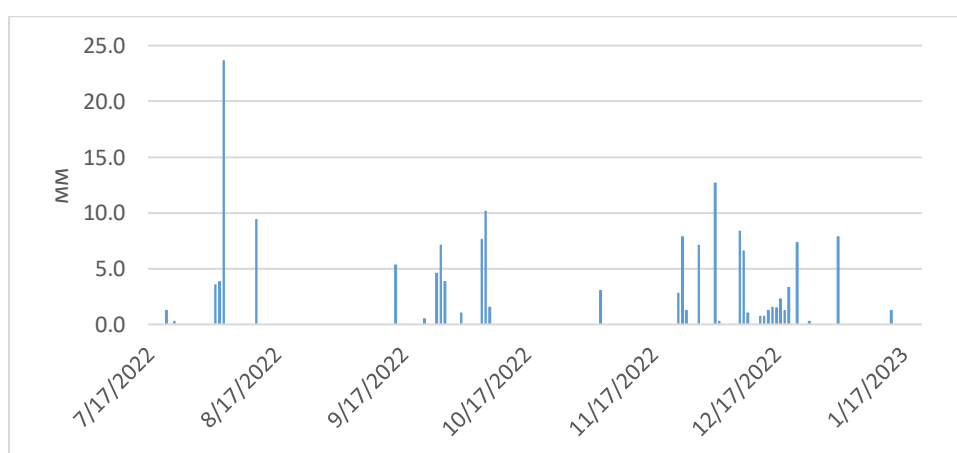


Рисунок 3.57 – Количество осадков в сутки в пушистодубовом лесу, мм.

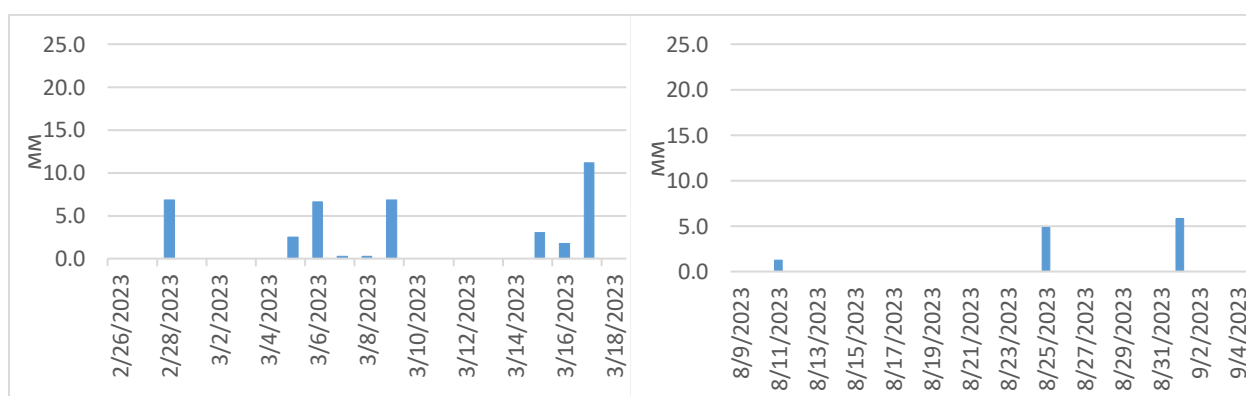
Суммарно за год проведения измерений на исследуемом участке выпало 473.3 мм осадков. Согласно полученным данным основное количество осадков выпадает в зимний период. При этом в течение года отмечаются дни с

экстремальным количеством выпавших осадков, максимум приходится на август, повторяя ситуацию 2013 и 2014 годов. Интенсивность дождя фиксируется метеостанцией как количество осадков за час в условиях, при которых интенсивность дождя была бы постоянной в течение этого времени. Большая часть осадков выпадала с интенсивностью не превышающую 6 мм/час, однако в августе во время экстремальных осадков интенсивность достигала 88 мм/час, 176 мм/час, а максимум достиг 298,7 мм/час.

Годовое количество осадков в районе ключевого участка можжевелевого леса представлено на рисунке 3.58.



а)



б)

в)

Рисунок 3.58 Количество осадков (мм) в можжевелевом лесу в период: а) с июня 2022 г. по январь 2023 г.; б) с февраля по март 2023 г.; в августе 2023 г.

Зафиксированный максимум осадков в период исследований приходится на 4 августа с 23,6 мм осадков в сутки, так же сильные дожди характерны для осенне-зимнего периода с дневным количеством осадков около 10 мм, в остальные периоды выпадает около 5 мм осадков в сутки. Помимо разницы в количестве осадков отмечаются и значительные перепады интенсивности. В целом, интенсивность варьировалась от 1 мм/час до максимума 176,3 мм/час. Данный максимум соответствует дню с наибольшим количеством выпавших осадков, и, как правило, количество осадков соотносится с их интенсивностью. Но фиксируются дни с кратковременными ливневыми осадками, в результате которых с высокой интенсивностью выпадает от 1 до 4 мм осадков.

Пушистодубовые сообщества задерживают кронами примерно 24 % выпадающих атмосферных осадков, что составляет в среднем 104 мм. На территории Карадага при относительно малом количестве выпадающих осадков леса могут задерживать до 100 % осадков [75]. При этом существует внутригодовая динамика этого процесса, связанная как со стадиями вегетации растений, так и с интенсивностью осадков. Так, максимальные значения задержания кронами осадков характерны для второй половины весны – начала лета в силу того, что именно в этот период растения достигают наибольшего пика зеленой фитомассы. Например, в июле в среднем задерживается 9 мм осадков или около 41 % выпадающих осадков. Интенсивность выпадающих осадков также влияет на их удержание кронами деревьев. В работе [75] указывается, что при выпадении на Карадаге осадков более 20 мм задерживается до 20 % выпадающих осадков, а при выпадении менее 2 мм осадков задерживается более 45 % выпадающих осадков. Анализ данных показывает, что рост количества осадков, наблюдаемый в Юго-Восточном Крыму, формируется за счет летних ливневых осадков [75], а это в свою очередь приводит к тому, что большая часть воды проникает под полог леса, практически не задерживаясь в кроне. Крупные капли, характерные для

ливневых осадков, слабо задерживаются на листьях и быстро стекают на поверхность лесной подстилки.

Существенную роль в структуре водного баланса пушистодубовых лесов оказывает стволочный сток. Этот эффект интересен, так как, по сути, он концентрирует водный поток непосредственно под корни деревьев, питая их. Однако в условиях склонового рельефа такой процесс может усиливать плоскостной смыл почвы, вызывать капельную и мелкоструйчатую эрозию почв, и как следствие обнажать корни деревьев и, тем самым, усиливать процессы формирования бедлендов. В работе [114] приводится методика оценки стволочного стока на территории Карадага, однако не приводятся количественные характеристики полученных результатов эксперимента. А.А. Клюкин [93] отмечает, что в дубовом лесу сомкнутостью 0,8, произрастающем на склоне крутизной 20–25° и длиной 100 м, средняя скорость пристволочной эрозии-аккумуляции составляет около 0,004 мм/год. В то же время, А.А. Клюкин [93] указывает на тот факт, что на крутых и коротких склонах, которые примыкают к руслам долин рек и тальвегам временных водотоков средняя скорость разрушения может достигать 2,0–3,9 мм/год и сопровождаться обнажением материнской породы. Таким образом такие процессы характерны для крутых склонов. На склонах средней и малой крутизны они мало проявляются и почва, как правило, хорошо задерживается травянистым ярусом. А.А. Клюкин [93] отмечает, что со стволов взрослого дуба может стекать 5–6 литров осадков в год, что, по нашему мнению, значительно завышено для исследуемых лесов. Более объективными представляются данные, представленные в работе [109], где указывается, что сток со стволов дуба достигает 3–5 % от годового слоя атмосферных осадков, что составляет примерно 20–40 мм/год. На стволочный сток также активно влияет шероховатость коры ствола деревьев, которая показывает на сколько реальная площадь стока больше идеальной цилиндрической формы ствола. У дубовых лесов этот показатель, по [114] достигает 1,2, а это в свою очередь позволяет отнести их к средне–

шероховатым породам. Для сравнения, в Испании стволовой сток в дубовых лесах достигает чуть более 10 % от количества выпавших осадков [212].

Сток с крон деревьев по измеренным данным на модельных деревьях составляет около 75 % от количества выпадающих осадков. Следует отметить, что подобные же результаты были получены и экспедициями В.А. Бокова в этом районе в 1997 и 1998 гг. [114]. Согласно его исследованиям, сомкнутый пушистодубовый лес в вегетационный период с мая по октябрь перехватывает около 25–35 % выпадающих осадков, что составляет примерно 103 мм во влажном 1997 г. и 55 мм – в сухом 1998 г. Однако, эта влага, поступая на поверхность почвы постепенно, с меньшей скоростью, чем ливневые осадки, как правило хорошо удерживается лесной подстилкой, формируя ее влагозапас. Это около 28 и 35 % от слоя осадков, выпавших за вегетационный период, 18 и 16 % от годового слоя осадков. В зимний период, в условиях отсутствия вегетации у лиственных пород, когда на деревьях нет листвы, выпадающие осадки практически полностью проникают под полог леса, лишь частично задерживаясь ветвями деревьев. По результатам измерений в зимний период задержание осадков не превышает среднегодовые значения и составляет чуть более 20 %. В тоже время нужно понимать, что, на зимние месяцы приходится максимум осадков, и с учетом просачиваемости сквозь кроны, этот показатель значительно больше летнего максимума и достигает не более 15 мм. Эти данные частично подтверждаются и в работе [61], где указано, что за период с 2000 по 2008 гг. в пределах пушистодубовых лесов Юго-Восточного Крыма было задержано 162 мм, что составляет примерно 30 % от количества выпавших осадков. Вместе с тем, как показывают наблюдения, для зимнего максимума осадков не столь характерны ливневые дожди, что приводит к возможности хорошего промачивания лесной подстилки и почвы. М.А. Кочкин [109] отмечает, что лесная подстилка дубовых лесов, состоящая из листьев и отмершей травянистой растительности, впитывает и задерживает воду выпадающих осадков и тем самым уменьшает поверхностный сток.

За период с 2010 по 2020 гг. наблюдается существенное уменьшение влажности почвы – в среднегодовом выражении примерно в 1,6 раза. Межсезонная динамика уменьшения влажности почвы показывает, что практически все сезоны года характеризуются падением средних значений относительной влажности близкими к среднегодовому значению, за исключением осени, когда относительная влажность уменьшается в 1,4 раза. Рассматривая межгодовую динамику важно выделить тот факт, что наблюдается существенное сокращение влажности почвы в декабре (более чем в 2,5 раза) и незначительные сокращения в сентябре. Максимальными относительными значениями влажности почвы характеризуются зимние месяцы, а также март, когда среднее значение не опускается ниже 25 %, а минимальными – конец лета – начало осени (август и сентябрь), когда значения относительной влажности почвы опускаются до 15–18 %.

Благодаря дополнительному блоку датчиков на открытом участке в зоне произрастания пушистодубового леса была измерена влажность почвы на разных горизонтах (рисунок 3.59).

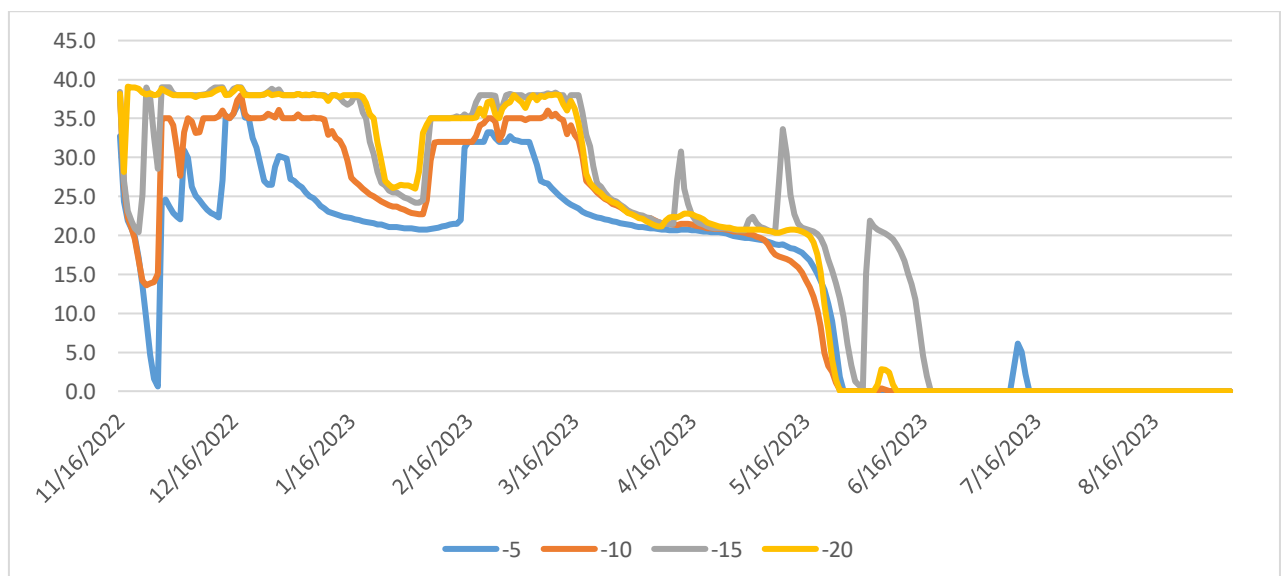


Рисунок 3.59 Изменение влажности почвы на разных горизонтах в пушистодубовом лесу

В зимний период и ранней весной фиксируются высокие значения влажности почвы с постепенным уменьшением показателя к поверхности. Выделяются три основных горизонта влажности: –5 см с наименьшими значениями, –10 см промежуточный слой и –15 см ниже которого сохраняются максимальные значения влажности почвы. Более глубокие горизонты почвы характеризуются плавным изменением значений влажности, в то время как поверхностный слой сильнее подвержен влиянию внешних факторов и изменяется значительно сильнее. Данные значения объясняются высокой облачностью, осадками и ежедневными туманами на рассматриваемой территории, что и создает условия избыточного увлажнения. Затем идет снижение значений в весенний период и резкий спад летом. При этом, в связи со спецификой датчиков, «0» обозначает отсутствие доступной растениям влаги в почве, а не абсолютное ее отсутствие, но само значение влажности достаточно мало.

Влажность почвы в можжевелевом лесу представлена в виде месячных значений (рисунок 3.60).

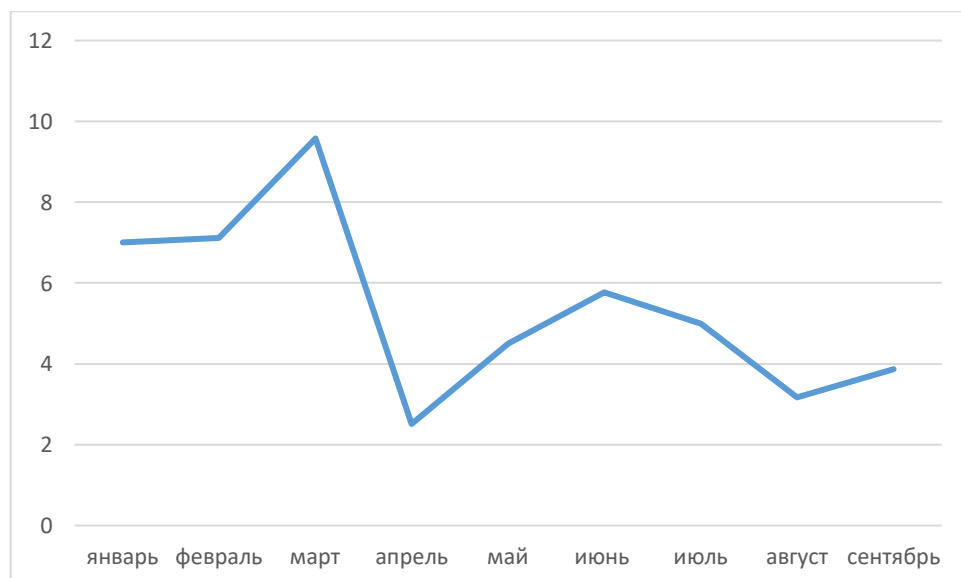


Рисунок 3.60 Влажность почвы в можжевелевом лесу

Аналогично ситуации в пушистодубовом лесу максимальные значения влажности почвы отмечаются в зимний период и начало марта, а затем происходит снижение значений летом.

Помимо описанных выше данных по водному балансу территории стоит отметить выявленные в ходе комплексных исследований особенности почвы в можжевелевом лесу. В ходе лабораторного анализа свойств почвы выявлено, что, в отличие от почвы в пушистодубовом лесу, почва под можжевельниками практически не пропускает воду. Намокание произошло только в верхнем сантиметровом слое, а для полного намокания пришлось приложить значительные усилия. Данный факт позволяет предположить, что большая часть попадающих на поверхность почвы осадков не проникают в почву, а стекают вниз по склону, не задерживаясь в ландшафте.

Причиной данного явления может быть наличие в хвойных растениях масел, которые образуют своеобразную пленку, затрудняющую пропускание влаги. Однако в связи со случайным обнаружением данного факта, соответствующие исследования для подтверждения гипотезы не проводились. Дальнейшее изучение данного явления позволит дополнить подход к изучению водного баланса ландшафтов хвойных лесов.

Эвапотранспирация в пределах пушистодубовых лесов за период с 2010 по 2020 гг. составляет в среднем 450 мм. Эти значения в целом равнозначны эвапотранспирации дубовых лесов в средиземноморском регионе: 343 ± 37 мм в целом для средиземноморья [205], 458 мм в провинции Таррагона в Испании [212], 823 мм в восточных Пиринеях [236]. Максимально значения эвапотранспирации в Средиземноморье могут достигать 1300 мм в год [317].

Если проанализировать межгодовую динамику величин эвапотранспирации в пределах дубовых лесов Карадага, то ее величины формируют устойчивый тренд к увеличению, что говорит о формировании более сухого климата территории (рисунок 3.61).

В тоже время следует отметить, что при рассмотрении среднегодовых значений эвапотранспирации в пределах пушистодубовых лесов в отдельные

годы, когда среднегодовое количество выпадающих осадков превышает испарение (2010, 2016, 2018 гг.), среднегодовые значения водного баланса остаются отрицательными.

Если рассматривать значения эвапотранспирации по сезонам года, то отчетливо проявляется факт преобладания количества выпадающих осадков над эвапотранспирацией в зимний и осенний периоды. Средние значения эвапотранспирации в зимний период составляет 11 мм, что составляет примерно 26 % от количества выпадающих осадков. Осенью средние значения эвапотранспирации составляют 22 мм, что составляет примерно 63 % от среднего количества выпадающих осенью осадков. В остальные сезоны года наблюдается превышение значений эвапотранспирации над количеством выпадающих осадков. Весной среднее значение эвапотранспирации составляет 56 мм, что в 2 раза превышает среднее количество выпадающих осадков за этот сезон года, а летом – 67 мм, что в 1,5 раза больше среднего количества выпадающих осадков летом. В тоже время во все сезоны года имеется устойчивая тенденция к увеличению среднегодовых значений эвапотранспирации.



Рисунок 3.61 – Среднегодовые значения связи эвапотранспирации и количества выпадающих осадков в пушистодубовом лесу в 2010–2020 гг.

Если говорить о распределении эвапотранспирации по месяцам, то за рассматриваемый период наибольшие значения эвапотранспирации характерны для мая, июня и июля, когда средние значения эвапотранспирации превышают 70 мм, наименьшие для декабря, января и февраля, когда средние значения эвапотранспирации не превышают 15 мм. Весной наблюдается плавный рост значений эвапотранспирации, а осенью – плавное снижение. В тоже время, анализ данных показывает и тот факт, что в последние годы наблюдается значительный рост эвапотранспирации в конце лета – начале осени.

Помимо расчетных значений эвапотранспирации в ходе исследований получены данные измерения метеостанции. При этом важно обратить внимание, что описываемая величина самостоятельно рассчитывается метеостанцией на основе температуры воздуха, влажности, средней скорости ветра и солнечного излучения, но не происходит учет конденсации. Таким образом фиксируются только положительные значения днем и 0 в ночное время, что дает завышенные дневные значения, но позволяет проследить основную тенденцию их изменения (рисунок 3.62).

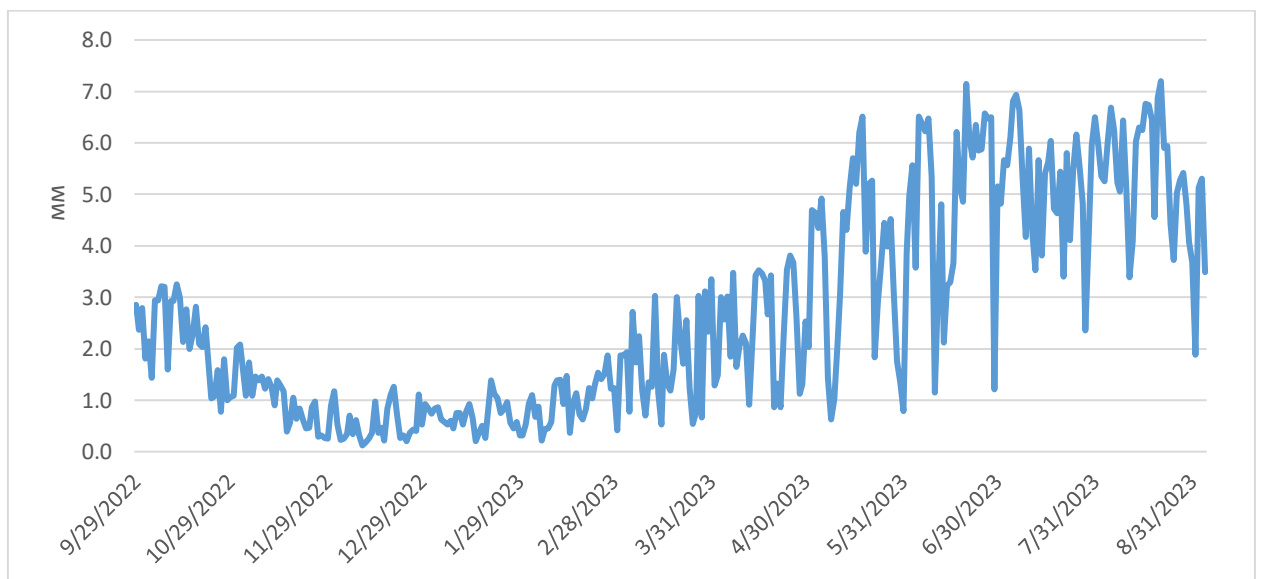
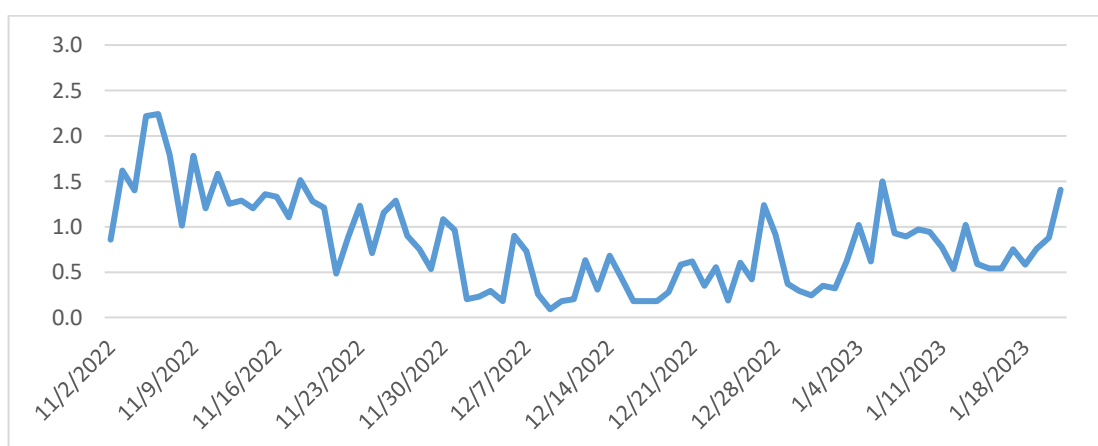


Рисунок 3.62 – Эвапотранспирация в пушистодубовом лесу, мм.

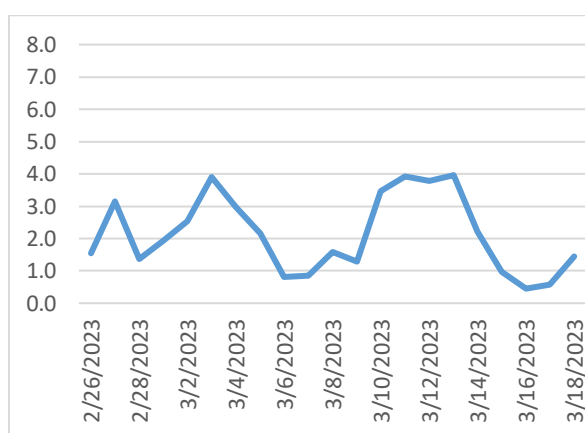
Наименьшие значения эвапотранспирации фиксируются в зимний период, затем происходит постепенное увеличение эвапотранспирации с ростом амплитуды к летнему периоду.

Аналогичные измерения проводились в можжевельном лесу, в котором также просматривается сезонная динамика изменения значений эвапотранспирации (рисунок 3.63).

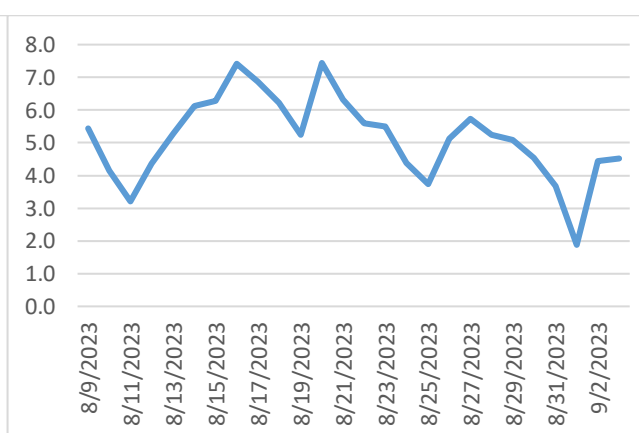
С конца осеннего периода происходит снижение дневных значений практически до 0, а в весенний период постепенно достигает 4 мм. Наибольшие значения закономерно отмечаются в летний период, максимум достигает 7,4 мм.



а)



б)



в)

Рисунок 3.63 – Эвапотранспирация (мм) в можжевельном лесу: а) в осенне-зимний период; б) в весенний период; в) в летний период

Важным аспектом в пространственной дифференциации пушистодубовых лесов играют снегосборы. А. А. Клюкин [93] отмечает, что в Юго-Восточном Крыму зимой бывает 6–7 дней с обложными морозящими дождями, а снег выпадает несколько раз, но быстро стаивает во время оттепелей. На Карадаге около 5 % осадков выпадает в виде снега [156]. По данным [114] в Юго-Восточном Крыму в районе Карадага и Эчкидага с наветренных северо-восточных склонов может сдуться от 50 % до 90 % снега. Как правило зимние осадки практически не задерживаются кронами деревьев в виду отсутствия листовых пластин, однако, в виду ветрового переноса могут выдуваться. Так, например, в 2019 г. в результате деятельности ветра образовался слой снега высотой в 15 см. За период с 2011 по 2020 гг. среднегодовое количество осадков в твердой форме составило 38 мм, что составляет примерно 9 % от общего количества выпадающих осадков. Однако, если говорить о межгодовой динамике рассматриваемых показателей, то отчетливо выделяются года с минимальным количеством выпадения твердых осадков (2013 г., 2020 г.), когда количество выпавших осадков в твердой форме не превышало 10 мм, и максимальным – например, 2015 и 2016 гг., когда количество выпавших осадков в твердой форме было более 60 мм. Несмотря на то, что продолжительность залегания снега на территории Юго-Восточного Крыма составляет не более недели, здесь очень характерно явление снегосборов, откуда накопленный снег передувается на склоны южных экспозиций, формируя на них более гидрофильные условия, чем на склонах северных экспозиций. Например, в пределах одной из балок на восточном склоне хребта Беш-Таш, склон южной экспозиции характеризуется лучшим увлажнением, нежели противоположный, из-за прилегающего к склону юго-юго-западной экспозиции обширного снегосбора, откуда при северо-восточных ветрах снег передувается на склон юго-юго-западной экспозиции (рисунок 3.64) [56]. В связи с этим склон юго-юго-западной экспозиции лучше залесён и характеризуется большей эрозионной изрезанностью, по сравнению с противоположным склоном северо-северо-

восточной экспозиции и на склонах юго-юго-западной экспозиции отмечаются участки с сильно смытым почвенным покровом.

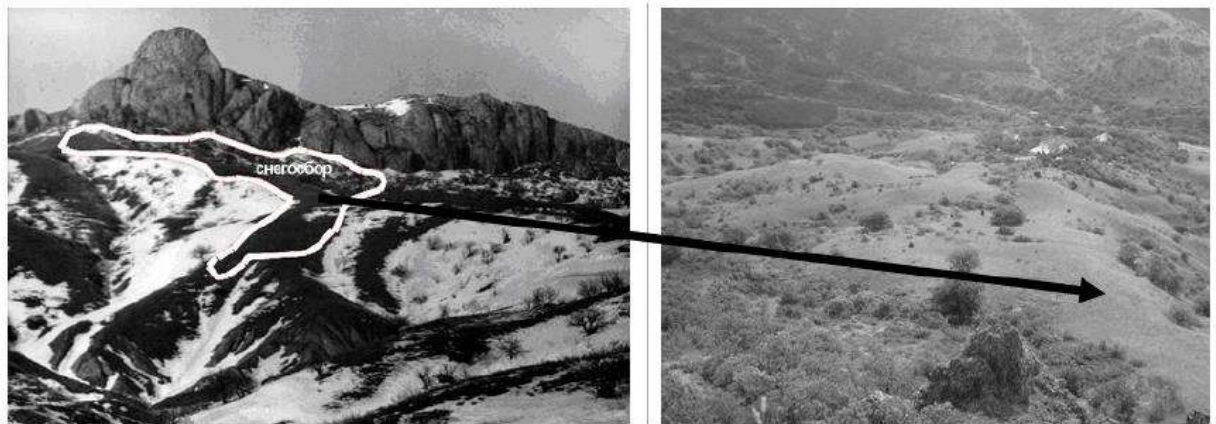


Рисунок 3.64 – Заснеженные склоны юго-юго-западной экспозиции балки на восточном склоне хр. Беш-Таш [56].

Формирование поверхностного стока зависит от целого комплекса факторов. Наблюдения, выполненные на стоковых площадках, позволили установить, что имеет наличие склоновый сток, который характеризуется незначительными показателями. В большинстве случаев сток вызывается либо таянием снега, либо выпадением интенсивных осадков. В 1996–1997 гг. средний сток составлял примерно $0,16 \text{ л/км}^2$ [114]. Среднее значение стока с 2010 по 2020 гг. зафиксированное по результатам измерений составило $0,04 \text{ л/км}^2$. Наибольшие средние значения стока зафиксированы в 2010 г. и составляют $0,09 \text{ л/км}^2$, а наименьшие в 2011 и 2020 гг. – чуть менее $0,02 \text{ л/км}^2$. Таким образом эти значения практически не оказывают влияние на итоговое уравнение водного баланса пушистодубовых лесов. Следует отметить снижение значений поверхностного стока в межгодовой динамике за рассматриваемый период.

С сентября по март в пределах пушистодубовых лесов может наблюдаться не более 20 дней с туманами, а в год – от 20 до 40 дней с туманами [91]. По данным метеостанции Феодосия [185] в среднем наблюдается 24 дня с туманами в год. В 2020 г. в пределах пушистодубового леса зафиксировано

36 дней с туманом, из которых 75 % пришлось на зимний период, что существенно влияет на приходную часть водного баланса.

При рассмотрении конденсации на растениях выбраны два участка: степной участок в зоне произрастания дуба пушистого и под кроной деревьев. В ноябре в утреннее время на обоих участках фиксируется высокая конденсация (практически вся поверхность листа покрыта влагой). В зависимости от погодных условий в конкретный день время выпадения конденсата может сдвигаться как в ночь, так и на день, при этом под кроной отмечается более плавный характер изменения степени увлажнения листа. В зимний период отмечаются дни, в которые конденсация отмечается круглосуточно, и для степного участка характерны меньшие значения, чем под кроной. Так же зафиксированы дни, в течение которых конденсации не зафиксировано, но в большинстве случаев она отмечается ранним утром. Помимо этого, под кроной может наблюдаться очень малое количество конденсируемой влаги в то время, как на открытом участке ничего не фиксируется.

В весенний период происходит превышение увлажненности листовой пластины под кроной над открытым участком, фиксируется увеличение продолжительности и степени увлажнения. С конца мая образование конденсата перестает иметь ежедневный характер, также отмечается превышение степени увлажнения на открытом участке, что может быть связано с более резким перепадом температур, чем под кроной.

Все описанные выше процессы протекают на фоне вытеснения степных сообществ верхних частей склонов лесными. Дело в том, что рост ливневых осадков в летний период приводит к быстрому смыву воды с верхних частей склонов, для которых характерны петрофитно-степные сообщества и росту влажности почвы в нижних частях склонов, что формирует условия, благодаря которым лесные сообщества поднимаются вверх по склону, снижая количество склоновых микрозон. Это явление отчетливо видно при расчете вегетационного индекса NDVI (рисунки 3.65, рисунок 3.66).

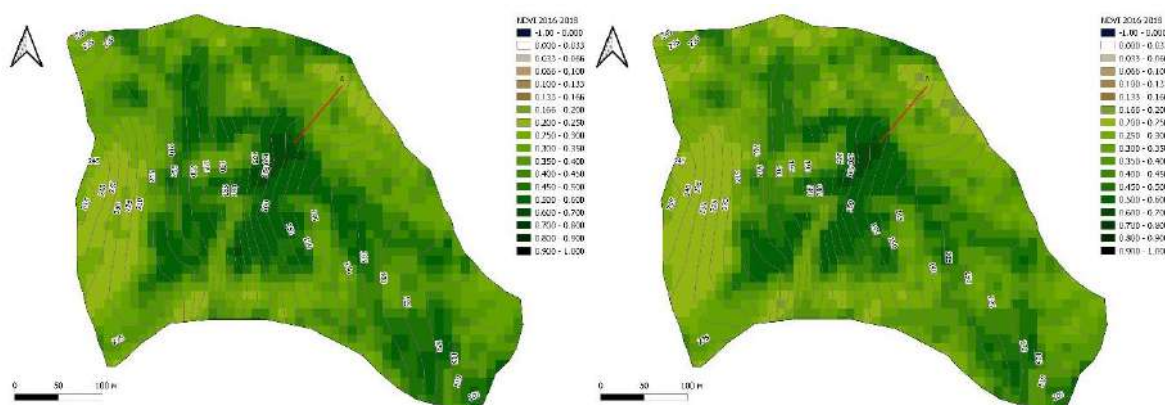


Рисунок 3.65 – Сравнение значений NDVI в 2016–2018 (а) и 2019–2021 гг. (б)

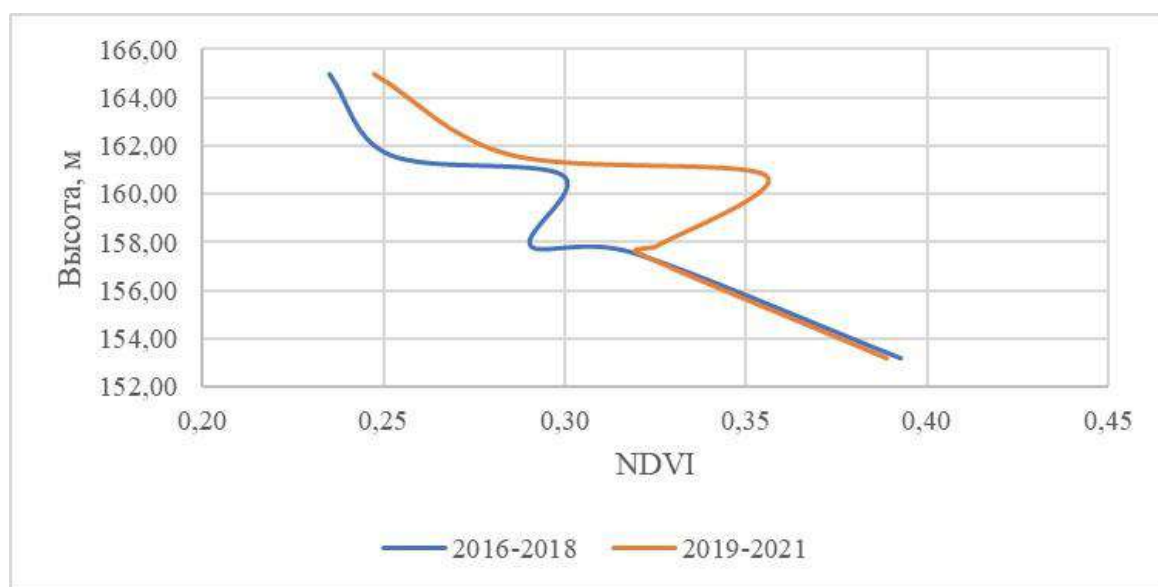


Рисунок 3.66 – Изменение значений NDVI за период с 2016 по 2018 гг и с 2019 по 2021 гг. от подножия склона к вершине по линии профиля

При анализе средних значений NDVI за август, полученных по космическим снимкам Sentinel-2 в период с 2016 по 2018 гг. и с 2019 по 2021 гг., можно отчетливо наблюдать рост значений вегетационного индекса NDVI и как следствие увеличение количества зеленой фитомассы.

На рисунке 3.66 видно, что до высоты 158 м на профиле произрастает лесная растительность и значения NDVI за два периода практически не изменяются. В то же время выше отметок 158 м, где изначально древесной

растительности меньше, и в августе, соответственно, меньше зеленой фитомассы, наблюдается рост значений NDVI и соответственно количества зеленой фитомассы.

3.4. Промежуточные выводы по разделу

На основе проведенных измерений основных климатических параметров на выбранных ключевых участках были рассчитаны значения радиационного, теплового и водного балансов.

Расчет радиационного баланса на открытом участке позволяет определить его внутригодовую динамику без учета растительного покрова. В лесном сообществе происходит перераспределение, поступающей энергии в ландшафт, и формируется баланс на поверхности кроны и под пологом. Динамика состояния растительного покрова и характеристики его кроны создают сложную мозаичную организацию и протекание процессов распределения потоков энергии в лесных ландшафтах, что характеризуется наличием на одной территории участков как с положительным, так и с отрицательным радиационным балансом.

Тепловой баланс описывается как распределение радиационного баланса на затраты тепла на испарение, вертикальный турбулентный теплообмен и поток тепла в почве. При анализе результатов отмечается формирования подкроновым пространством собственного температурного режима, отличного от открытого участка. Так в зимний период происходит сохранение тепла почвой и воздухом, а в летний наоборот, измерения на открытом участке превышали значения под пологом.

При описании водного баланса отмечается относительно небольшое среднегодовое количество осадков по сравнению с типичным Средиземноморьем, что может выступать лимитирующим фактором для распространения лесной растительности. Также подчеркивается роль крон в задержании влаги в ландшафте, при этом наиболее выраженное задержание наблюдается при низкой интенсивности осадков. Значительная часть водного

баланса (до 25 %) приходится на горизонтальные осадки, такие как конденсация из тумана, изморозь, наморось, гололед и другие. Благодаря особенностям рельефа и атмосферному переносу формируются снегосборы на склонах с южной экспозицией. Описанные процессы создают условия для постепенного вытеснения степных сообществ и продвижения лесных вверх по склону, что подтверждается значениями индекса NDVI.

РАЗДЕЛ 4 ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЮГО-ВОСТОЧНОГО КРЫМА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

4.1. Факторная энтропия низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов

На территории Карадагского заповедника на ключевых участках пушистодубового и можжевельного лесов в ходе проведения исследований были получены данные по крутизне и экспозиции кронового рельефа в весенний и летний периоды, распределение по нему поступающей солнечной радиации в течение дня и значения вегетационного индекса NDVI. На основе этих данных была рассчитана энтропия, демонстрирующая сложность изучаемой территории по представленным признакам, как показатель формирования стратегий развития или стабилизации ландшафтов при изменении характера кронового рельефа и количества солнечной радиации во времени.

Из-за сезонной смены состояния кроны деревьев существенно изменяются морфометрические характеристики кронового рельефа, в том числе и распределение фиксируемых прибором экспозиции и уклонов.

Т.А. Огнева (1967), В.О. Смирнов (2009), В.А. Боков и Р.В. Горбунов (2011), Р.В. Горбунов (2011a, 2011b) в своих работах описывали роль экспозиций склонов в формировании микроклиматических условий, что подтверждает важность изучения сезонной динамики формируемого лесом кронового рельефа.

В можжевельном лесу показатель энтропии экспозиции склонов кронового рельефа уменьшается к лету, то есть происходит уравнивание распределения экспозиций с развитием кроны широколиственных деревьев. При этом неравномерное распределение экспозиций в весенний период сменяется преобладанием юго-восточных и южных склонов летом, согласно экспозиции склона земной поверхности. В пушистодубовом лесу наоборот отмечается увеличение значений энтропии к летнему периоду. Со сменой

сезонов выявлен переход из пространства с относительно равномерным распределением экспозиций склонов в рельеф с преобладанием северо-восточной и восточной экспозицией, что также соответствует направлению склона земной поверхности. Таким образом через энтропию демонстрируется усложнение показателя экспозиции (таблица 4.1).

Таблица 4.1 Значения показателей энтропии в пушистодубовом и можжевелевом лесах в весенний и летний периоды

	Энтропия по Шеннону			
	Пушистодубовый лес	Можжевелевый лес	Пушистодубовый лес	Можжевелевый лес
	Весенний период		Летний период	
Поступление солнечной радиации в 9:00	0,222	0,185	0,248	0,323
Поступление солнечной радиации в 12:00	0,202	0,19	0,214	0,210
Поступление солнечной радиации в 15:00	0,232	0,199	0,29	0,212
Поступление солнечной радиации в 17:00	0,193	0,143	0,32	0,322
Поступление солнечной радиации за сутки	0,297	0,274	0,264	0,239
Экспозиция	0,28	0,374	0,348	0,334
Крутизна	0,012	0,027	0,36	0,4
NDVI	0,191	0,326	0,134	0,356

В условиях лиственных пород деревьев зимой отсутствие кроны позволяет фиксировать стволы и ветви деревьев, которые также идентифицируются приборами как поверхности с определенной экспозицией, что в зимний период способствует равномерному распределению данного показателя. А в летний период при развитии кроны формируемый кроновый

рельеф не только перераспределяет экспозиции согласно направлению роста листвы, но и сохраняет общий характер относительно склона земной поверхности.

Значения крутизны склонов кронового рельефа на обоих участках леса имеют схожий характер изменения. В весенний период отмечается значительное преобладание больших значений уклонов поверхности, а в летний период распределение значений происходит более равномерно. Это связано с отсутствием листвы в зимне-весенний период и фиксацией стволов и веток деревьев, что распознается как очень крутые склоны. А летом за счет сформированной кроны фиксируемый рельеф сглаживается. Более ярко данная ситуация проявляется в пушистодубовом лесу, как полностью лиственном, а в можжевельном вечнозеленом лесу в меньшей степени за счет отдельных лиственных деревьев и кустарников.

При рассмотрении значений факторной энтропии по распределению NDVI выделяется разница между значениями пушистодубового и можжевельного лесов. Относительно высокие показатели в можжевельном лесу демонстрируют равномерное распределение количества значений по выделенным контурам, в то время как в пушистодубовом лесу большая часть располагается в среднем диапазоне значений. При сезонном рассмотрении в пушистодубовом лесу отмечается превышение весенних значений энтропии над летними на 0,07, что обозначает более сложную организацию в весеннее время и стабилизацию летом. В можжевельном лесу обратная ситуация, летнее значение энтропии превышает весеннее на 0,03, демонстрирующий небольшое усложнение распределения параметра NDVI в пространстве.

Значения энтропии поступления солнечной радиации на поверхность крон и на не закрытые ими участки рассчитывалась как для суток в целом, так и для часовых периодов, что позволило проследить изменения в течение светового дня. Утром в 9 часов на территории КЛЭС в весенний период характерно большое количество затененных участков, а летом отмечается более сложное распределение без четкой закономерности. Это отражается в

увеличении энтропии с 0,22 до 0,25. Для можжевельного леса в данное время характерна сильная затененность за счет рельефа, что определяет значительное количество низких значений поступающей солнечной радиации. При этом в летний период отмечается меньший разброс значений и более равномерное их распределение. В связи с этим при смене сезонов происходит увеличение показателя энтропии до 0,32.

В полдень на стационаре в весенний период характерен большой диапазон значений с преобладанием низких значений, к лету формируется более сложная ситуация с преобладанием высоких значений, значение энтропии увеличивается с 0,20 до 0,21, что демонстрирует усложнение характера распределения поступающей радиации. В можжевельном лесу в рассматриваемый период также отмечается большая амплитуда значений. Характер распределения значений при смене сезонов сохраняется, но в летний период увеличивается диапазон значений, что приводит к увеличению энтропии с 0,19 до 0,21.

В 15-часовой период в пушистодубовом лесу также наблюдается изменение характера поступления солнечной радиации по сезонам. Весной характерно относительное равномерное распределение значений с пиком в теневых участках. Летом пик сохраняется, но наблюдается постепенный рост площади с большим поступлением солнечной радиации. Значения энтропии в таких условиях увеличиваются с 0,23 до 0,29. В можжевельном лесу характер распределения значений сохраняется с увеличением диапазона значений в летний период. Показатель энтропии увеличился с 0,20 до 0,21.

В 17-часовой период на обоих рассматриваемых участках в весенний период зафиксирован маленький диапазон значений с сильным преобладанием затененных участков, к летнему периоду диапазон значительно увеличивается. Таким образом энтропия в пушистодубовом лесу возрастает с 0,19 до 0,32, и с 0,14 до 0,32 в можжевельном, что указывает на усложнение структуры распределения солнечной радиации.

При рассмотрении дня в целом в пушистодубовом лесу в весенний период отмечается плавное уменьшение количества значений от минимума к максимуму, в летний период ситуация обратная, и преобладают высокие значения поступающей радиации. Аналогичная ситуация отмечается и в можжевельниковом лесу при смене сезонов. В обоих случаях происходит снижение энтропии на 0,03–0,04. Несмотря на обратную картину при рассмотрении отдельно часовых значений, рассмотрение суточных значений позволяет говорить о более равномерном распределении поступающей солнечной радиации. Данные значения указывают на то, что при смене сезонов за счет высоты солнца над горизонтом в летний период происходят процессы стабилизации.

Таким образом показатель энтропии демонстрирует сезонные изменения сложности распределения солнечной радиации, индекса NDVI, экспозиции и крутизны кривой рельефа, изменения которых влекут за собой изменение некоторых климатических параметров, таких как температура воздуха, почвы, количества испарения. Это, в свою очередь, приводит к трансформации всей системы взаимодействий внутри ландшафта. На основании анализа видно, что в формировании факторной энтропии ландшафта большую роль играет сезонная динамика его собственных и окружающих компонентов, что отражается в формировании стратегий развития или стабилизации основных типов ландшафтов.

4.2. Динамика значений NDVI в Юго-Восточном Крыму

В пределах Юго-Восточного Крыма наблюдается устойчивый рост значений вегетационного индекса NDVI с 2001 по 2022 гг. (рисунок 4.1).

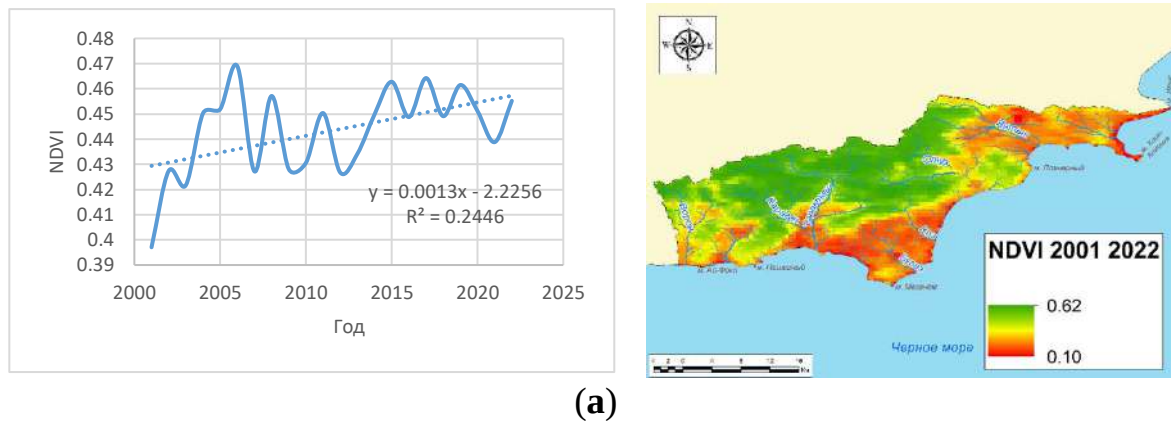


Рисунок 4.1 Динамика среднегодовых значений вегетационного индекса NDVI в 2001–2022 гг. в Юго-Восточном Крыму: а) динамика среднегодовых значений; б) карта средних значений NDVI.

Как видно из рисунка 4.1 в пределах Юго-Восточного Крыма с 2001 по 2022 гг. наблюдается тенденция к росту значений вегетационного индекса и имеется положительный тренд на увеличение. Это говорит в первую очередь о том, что на рассматриваемой территории наблюдается рост количества зеленой фитомассы растительного покрова. На рисунке 4.2 более подробно представлено распределение среднегодовых значений вегетационного индекса в пределах основных типов растительного покрова. Наибольшие значения индекса NDVI характерны для скальнодубовых лесов, а наименьшие – для пушистодубовых редколесий.

За период с 2001 по 2022 гг. среднее значение NDVI в Юго-Восточном Крыму составило 0,443. Максимальные среднегодовые значения были зафиксированы в 2006 году и составляли 0,469, а минимальные – 0,397. Пространственное распределение значений NDVI в районе исследования с 2001 по 2022 год характеризуется диапазоном колебаний от 0,1 до 0,62.

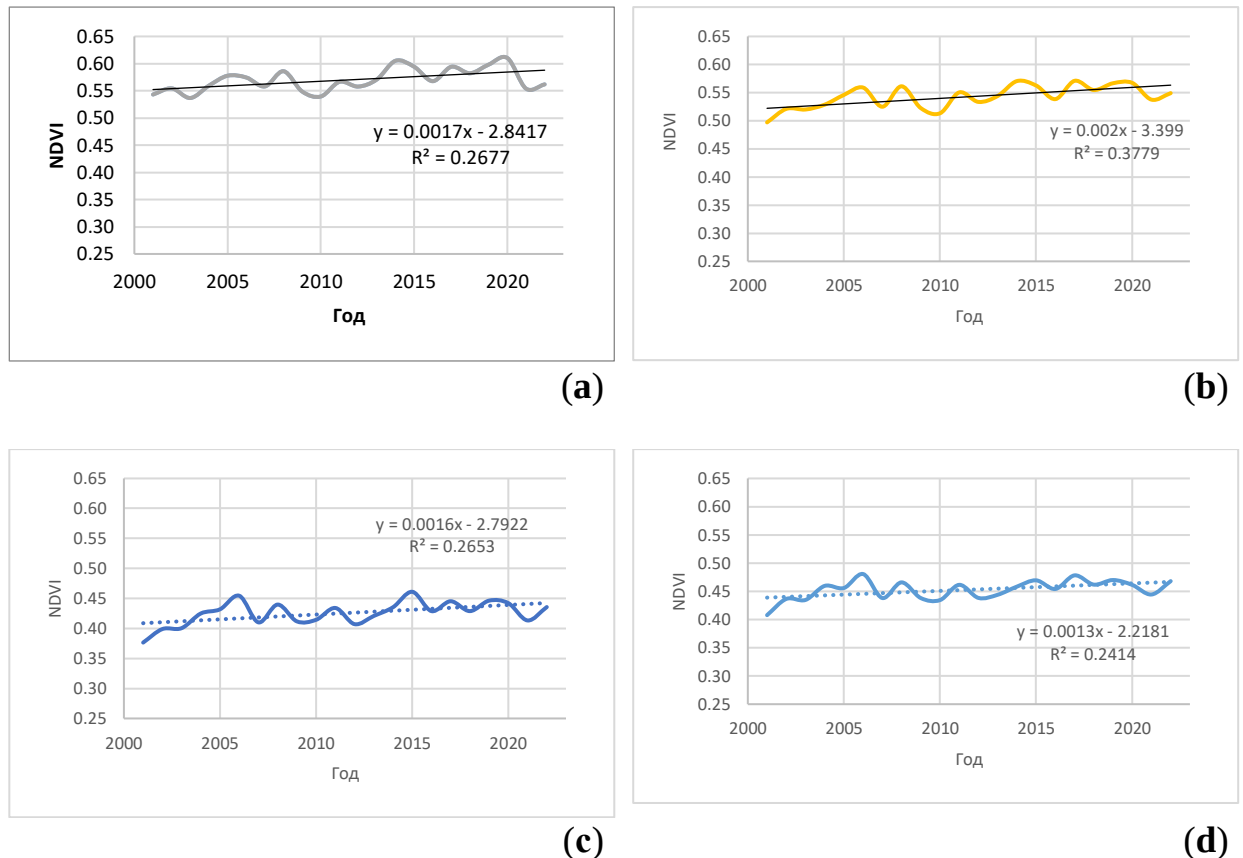


Рисунок 4.2. Динамика среднегодовых значений вегетационного индекса NDVI в 2001–2022 гг. в пределах основных растительных сообществ в Юго-Восточном Крыму: (а) скальнодубовые с участием грабовых и ясеневых лесов; (б) пушистодубовые леса и их производные из грабинника; (с) можжевельниковые редколесья; (d) редколесья из дуба пушистого в комплексе с томилярами и саванноидами.

За период с 2001 по 2022 гг. среднее значение NDVI в Юго-Восточном Крыму составило 0,443. Максимальные среднегодовые значения были зафиксированы в 2006 году и составляли 0,469, а минимальные – 0,397. Пространственное распределение значений NDVI в районе исследования с 2001 по 2022 год характеризуется диапазоном колебаний от 0,1 до 0,62. Если сравнивать полученные среднегодовые значения за каждый год со среднемноголетним значением, то отчетливо прослеживается тенденция к разбиению исследуемого временного интервала на 2 периода – до 2014 года, когда преобладали среднегодовые значения NDVI меньше чем

среднемноголетние, и с 2014 года – когда среднегодовые значения NDVI стали больше среднемноголетних.

В пределах можжевельных редколесий среднее значение NDVI составляет 0,43; в пределах скальнодубовых лесов – 0,57; пушистодубовых лесов – 0,54; пушистодубовых редколесий – 0,45. Здесь также характерны положительные тренды направленности увеличения значений NDVI, причем наиболее четко они выражены в пределах пушистодубовых лесов.

В пределах Юго-Восточного Крыма максимальный пик вегетационной активности характерен для августа (Горбунов, 2022). На рисунке 4.3 представлены среднemesячные, максимальные и минимальные значения вегетационного индекса NDVI за август с 2001 по 2022 года.

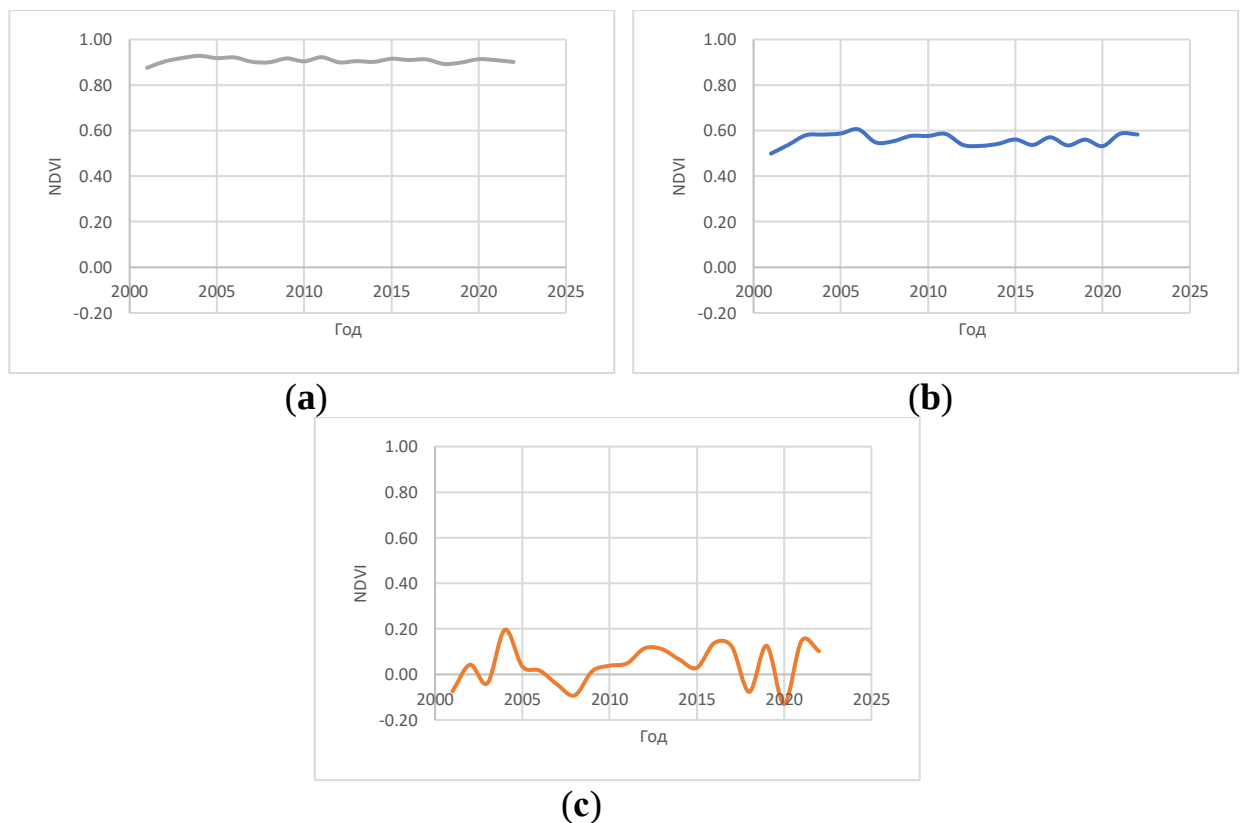


Рисунок 4.3 Значения NDVI в Юго-Восточном Крыму в августе: (a) максимальные значения; (b) средние значения; (c) минимальные значения.

На рисунке 4.4 представлены минимальные, максимальные и средние значения вегетационного индекса NDVI в августе для различных растительных сообществ в Юго-Восточном Крыму.

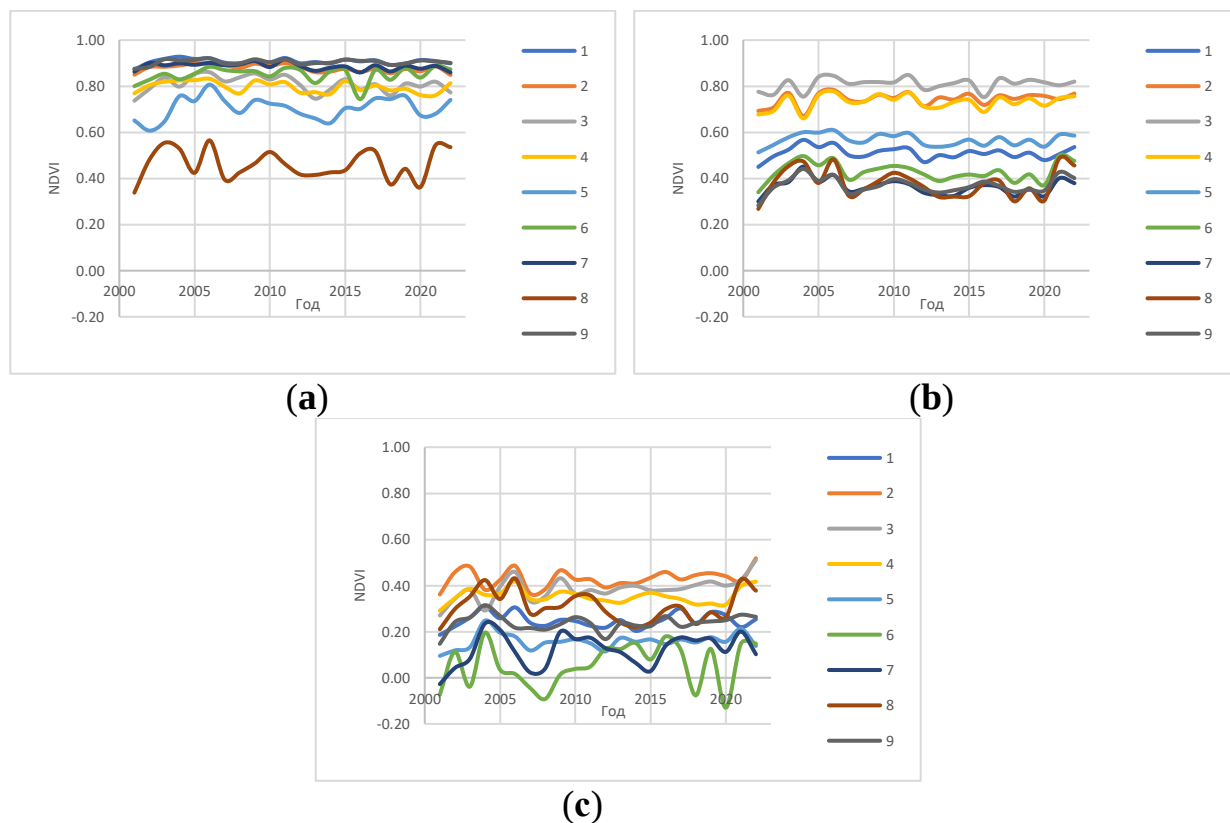


Рисунок 4.4 Значения NDVI в пределах растительных сообществ Юго-Восточного Крыма в августе: (а) максимальные значения; (б) средние значения; (с) минимальные значения (цифрами на графиках обозначены: 1 – можжевеловые редколесья; 2 – буковые леса с участием клена Стевена; 3 – скальнодубовые с участием грабовых и ясеневых лесов; 4 – пушистодубовые леса и их производные из грабинника; 5 – редколесья из дуба пушистого в комплексе с томилярами и саванноидами; 6 – разнотравно-ковыльные настоящие степи предгорий; 7 – сады и виноградники на месте пушистодубовых лесов и разнотравно-ковыльных настоящих степей; 9 – сельскохозяйственные угодья зерновых, пропашных культур на месте разнотравно-ковыльных степей и пушистодубовых лесов).

График максимальных значений для большой по площади территории исследования сильно сглаживается и не позволяет установить пространственно-временные различия в исследуемой территории. В тоже время при уменьшении исследуемых пространственных объектов и их площадей различия становятся более заметными и возможность использования максимальных данных возрастает, в то время как средние значения показывают различия и их можно анализировать и интерпретировать. Сглаживание графика максимальных значений достигается за счет того, что он показывает максимальные значения единичных пикселей, которые могут пространственно находиться в различных частях исследуемого региона и не показывать всей реальной картины происходящих изменений. Схожая ситуация характеризует и распределение минимальных значений NDVI в августе, только здесь ситуация, наоборот, характеризуется значительным разбросом значений, что связано с тем, что отдельные пиксели изображения характеризуются отрицательным значением NDVI. Таким образом получается, что использование для анализа максимальных и минимальных значений практически ограничено допустимо, но их нужно применять с учетом количества минимальных и максимальных пикселей изображения в пределах исследуемого участка территории. Мы не использовали минимальные значения сразу, так как в силу особенностей территории минимальные значения могут содержать отрицательные значения NDVI из-за наличия водных объектов и динамики береговой линии моря. Анализ всех значений NDVI, встречающихся в пределах территории исследования, показывает, что для отдельных лет на минимальные и отрицательные значения приходится только менее 0,1 % всех данных. Схожая картина и с распределением максимальных значений. Мы проанализировали значения $NDVI > 0.9$ и установили, что для большинства лет эти значения или отсутствуют, или составляют менее 0,5 % всех данных. В тоже время информация о минимальных и максимальных значениях может быть полезна для выявления отдельных очагов роста или спада, однако они не могут дать

представление о динамике растительности и всей картины функционирования сразу.

Таким образом, в исследовании мы опирались на использование средних значений NDVI, так как минимальные и максимальные значения являются единичными, составляют малую долю анализируемой выборки и не могут целостно характеризовать исследуемую территорию Юго-Восточного Крыма.

4.3. Тренд NDVI

В пределах территории Юго-Восточного Крыма наблюдается значительная пространственно-временная дифференциация не только самих значений NDVI, но и направленности трендов их изменения. На рисунке 4.5 показан анализ трендов изменения NDVI за весь период с 2001 по 2022 гг. и с разбивкой на пятилетние периоды.

Как видно из рисунка 4.5а, за период с 2001 по 2022 гг. в целом наблюдается положительный тренд изменения значений NDVI, что свидетельствует об увеличении количества зеленой фитомассы растений. В то же время отрицательный тренд был в отдельных участках рядом с городами Судак и Феодосия. Если рассмотреть пространственно-временную динамику за пятилетние периоды (рисунок 4.5b–4.5f), то можно отметить, что в пределах каждой ячейки пространства (пикселя) формируется довольно сложная картина. В период с 2001 по 2004 гг. наблюдался заметный спад количества зеленой фитомассы и снижение количества зеленой фитомассы растительного покрова в центральной, северной и северо-западной частях Юго-Восточного Крыма. В период с 2005 по 2009 гг. в этих районах формируются условия для роста растительности, о чем свидетельствуют положительные значения тренда NDVI, а в районах, где в 2001–2004 гг. наблюдались условия улучшения факторов среды для произрастания растительности – в 2005–2009 гг. наблюдаются условия, приводящие к снижению зеленой фитомассы растений. В 2010–2014 гг. ситуация чрезвычайно схожа с ситуацией в 2001–2004 гг.

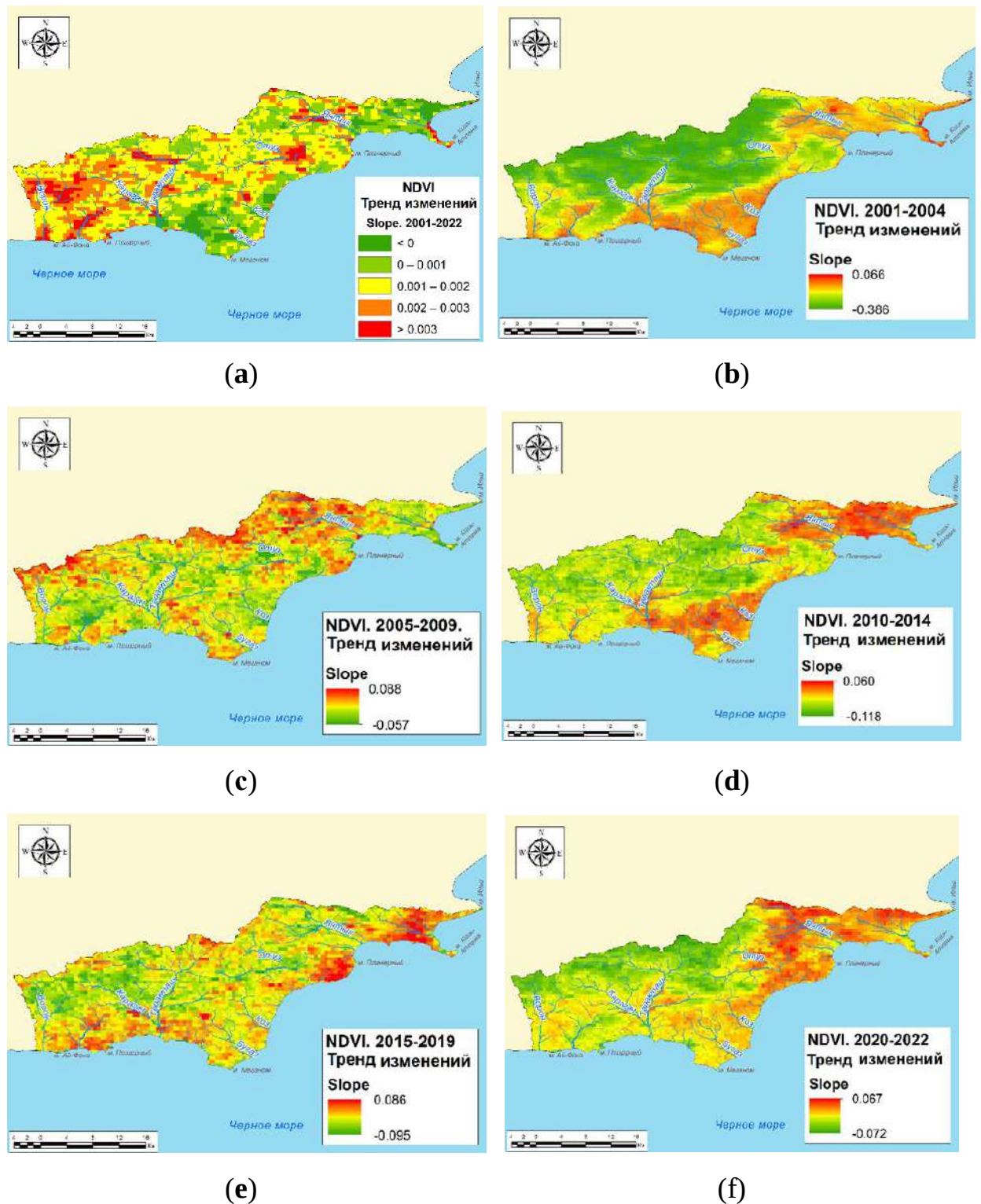


Рисунок 4.5 Тренд значений NDVI: (a) 2001–2022; (b) 2001–2004; (c) 2005–2009; (d) 2010–2014; (e) 2015–2019; (f) 2020–2022.

С 2015 по 2019 гг. наблюдается усложнение картины роста и уменьшения растительности, однако, в целом ситуация схожа с периодом 2005–2009 гг. Можно отметить, что начиная с 2015 года наблюдаются

отрицательные тренды изменения NDVI в западной и северо-западной частях Юго-Восточного Крыма и формируется тенденция, направленная на сокращение количества зеленой фитомассы растительности. В связи с этим можно выделить квазипятилетние циклы, изменения растительного покрова в Юго-Восточном Крыму. Если рассматривать средние значения тенденции изменения NDVI (NDVI Trend) в основных растительных сообществах, то можно отметить, что в целом по каждому сообществу наблюдается или рост растительности, или практическая неизменность (таблица 4.2).

Таблица 4.2 Среднемноголетние значения изменения трендов в пределах растительных сообществ Юго-Восточного Крыма в 2001–2022 гг.

Тип растительных сообществ	Slope		
	Минимум	Максимум	Среднее
Можжевеловые редколесья	-0,0012	0,0060	0,0015
Буковые леса с участием клена Стевена	0,0000	0,0040	0,0014
Скальнодубовые с участием грабовых и ясеневых лесов	-0,0007	0,0050	0,0010
Пушистодубовые леса и их производные из грабинника	0,0000	0,0040	0,0014
Редколесья из дуба пушистого в комплексе с томилярами и саванноидами	-0,0020	0,0050	0,0010
Разнотравно-ковыльные настоящие степи предгорий	-0,0020	0,0103	0,0010
Сады и виноградники на месте пушистодубовых лесов и разнотравно-ковыльных настоящих степей	-0,0030	0,0050	0,0003
Сельскохозяйственные угодья зерновых, пропашных культур на месте разнотравно-ковыльных степей и пушистодубовых лесов	-0,0010	0,0030	0,0011
Урбоценозы населенных пунктов	-0,0020	0,0050	0,0010

В пределах ландшафтов можжевеловых и дубовых лесов характерны наибольшие значения положительных трендов изменчивости, в результате чего в целом в пределах этих ландшафтов формируются стратегии развития. Наименьшей изменчивости подвержены ландшафты антропогенно созданных растительных сообществ (садов и виноградников), так как на всем протяжении

своего существования они поддерживаются искусственно в результате деятельности человека.

4.4. Коэффициент вариации

Рассмотрим более подробно изменение коэффициента вариации значений NDVI в Юго-Восточном Крыму (рисунок 4.6).

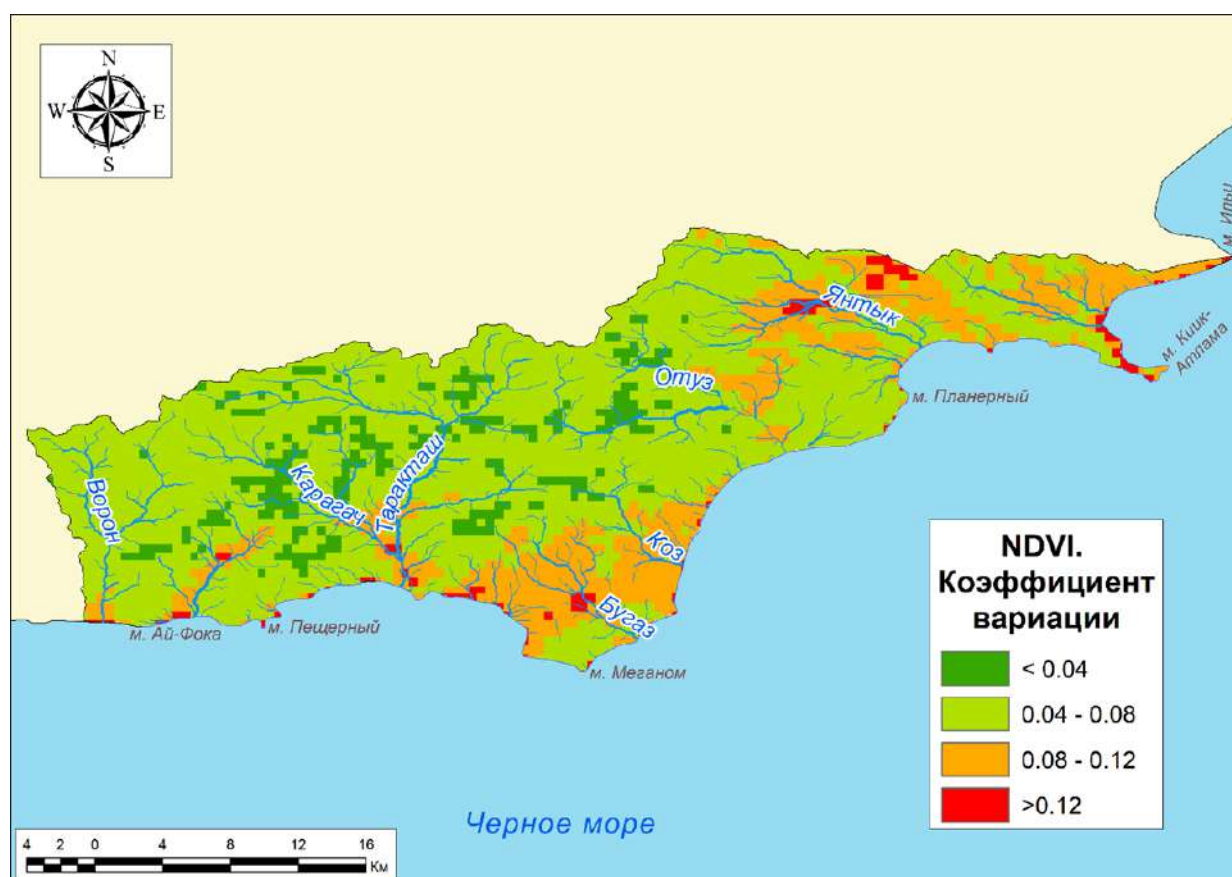


Рисунок 4.6 Коэффициент вариации NDVI в Юго-Восточном Крыму

Оценка коэффициента вариации значений NDVI позволила выделить наиболее стабильные и сильно изменяемые значения NDVI в Юго-Восточном Крыму. Как видно из рисунка 4.6 большая часть исследуемого региона характеризуется стабильным распределением значений NDVI. Незначительные и сильные изменения характерны для южной и юго-восточной частей исследуемого региона.

В таблице 4.3 представлены изменения значений коэффициента вариации NDVI в пределах растительных сообществ Юго-Восточного Крыма в 2001–2022 гг.

Таблица 4.3 Среднегодовое значение изменения трендов в пределах растительных сообществ Юго-Восточного Крыма в 2001–2022 гг.

Тип растительных сообществ	CV		
	Мин.	Макс.	Ср.
Можжевельниковые редколесья	0.04	0.21	0.06
Буковые леса с участием клена Стевена	0.04	0.07	0.05
Скальнотубовые с участием грабовых и ясневых лесов	0.03	0.09	0.05
Пушистотубовые леса и их производные из грабинника	0.03	0.09	0.05
Редколесья из дуба пушистого в комплексе с томилярами и саванноидами	0.03	4.43	0.06
Разнотравно-ковыльные настоящие степи предгорий	0.04	2.90	0.08
Сады и виноградники на месте пушистотубовых лесов и разнотравно-ковыльных настоящих степей	0.03	0.44	0.08
Сельскохозяйственные угодья зерновых, пропашных культур на месте разнотравно-ковыльных степей и пушистотубовых лесов	0.06	0.13	0.09
Урбоценозы населенных пунктов	0.04	0.19	0.08

Как видно из таблицы 4.3 и рисунка 4.6 наиболее стабильными выступают значения ландшафтов лесов, по сравнению с ландшафтами степей и антропогенно созданных сельскохозяйственных угодий и населенных пунктов.

4.5. Индекс Херста

Наиболее полно оценить изменчивость растительности и дать оценку прогнозным изменениям позволяет индекс Херста (Hurst Index). На рисунке 4.7 исследуется пространственное разнообразие значений индекса Херста Юго-Восточном Крыму, а в таблице 4.4 предоставлена подробная информация о минимальных, максимальных и средних значениях индекса Херста, относящихся к основным растительным сообществам в том же регионе.

Установлено, что диапазон значений индекса Херста варьирует от 0,49 до 0,96, с рассчитанным средним значением 0,75.

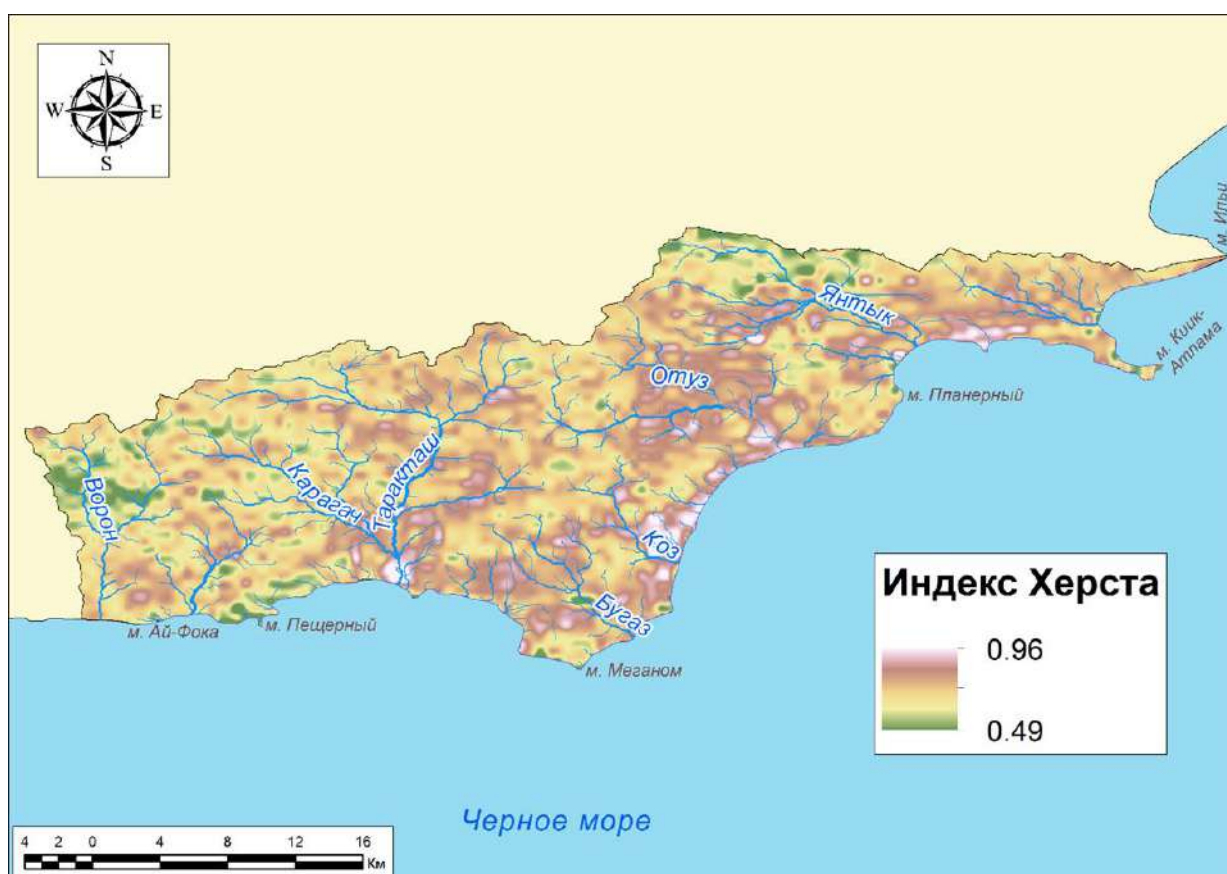


Рисунок 4.7 Значение индекса Херста в Юго-Восточном Крыму

Таблица 4.4 Значения индекса Херста (Hurst Index) в пределах растительных сообществ Юго-Восточного Крыма в 2001–2022 гг.

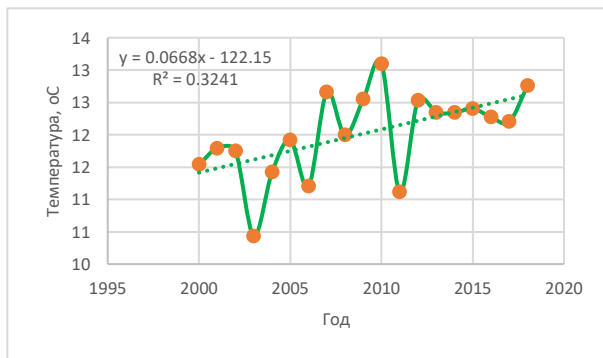
Тип растительных сообществ	Индекс Херста		
	Мин.	Макс.	Ср.
Можжевеловые редколесья	0,49	0,85	0,73
Буковые леса с участием клена Стевена	0,58	0,84	0,71
Скальнодубовые с участием грабовых и ясеневых лесов	0,58	0,87	0,74
Пушистодубовые леса и их производные из грабинника	0,59	0,88	0,74
Редколесья из дуба пушистого в комплексе с томилярами и саванноидами	0,56	0,93	0,76
Разнотравно-ковыльные настоящие степи предгорий	0,54	0,94	0,76
Сады и виноградники на месте пушистодубовых лесов и разнотравно-ковыльных настоящих степей	0,59	0,93	0,77
Сельскохозяйственные угодья зерновых, пропашных культур на месте разнотравно-ковыльных степей и пушистодубовых лесов	0,65	0,87	0,74
Урбоценозы населенных пунктов	0,61	0,94	0,78

Диапазон значений индекса, рассчитанных для данных NDVI, проявляет выраженную пространственную гетерогенность. Наименьшие значения индекса Херста преимущественно наблюдаются в северных и северо-западных

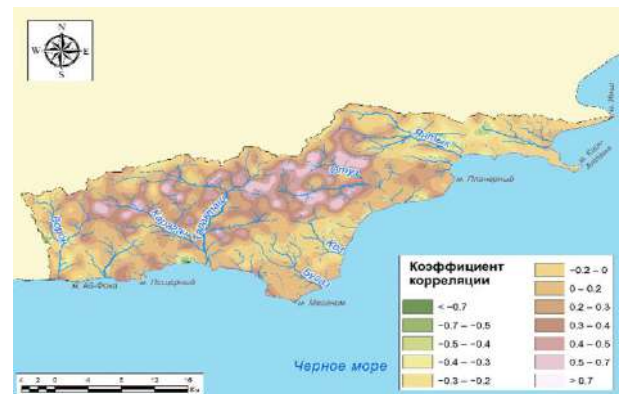
секторах области исследования, в то время как наивысшие значения систематически фиксируются в прибрежных, южных и юго-восточных регионах. Высокие значения индекса Херста особенно выделяются вблизи значимых населенных пунктов, таких как Щebetовка, Курортное, Судак, Солнечная Долина и другие.

4.6. Влияние климатических факторов на изменение NDVI в Юго-Восточном Крыму

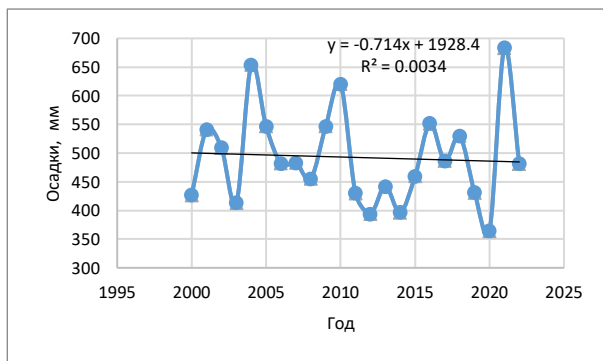
Для оценки воздействия климатических факторов на изменение NDVI проанализированы динамика изменения среднегодовых значений температуры воздуха, количества выпадающих осадков и солнечной радиации в пределах Юго-Восточного Крыма, и рассчитаны коэффициенты корреляции между значениями этих факторов и значениями NDVI (рисунок 4.8).



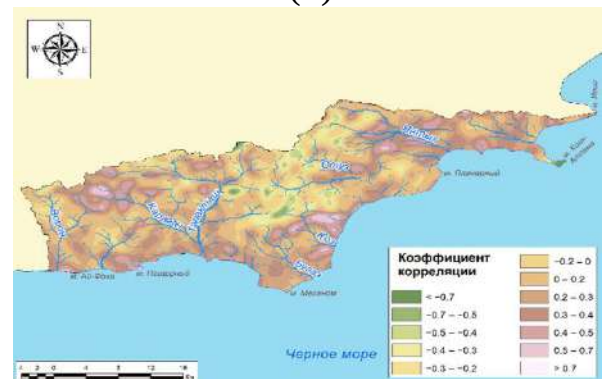
(a)



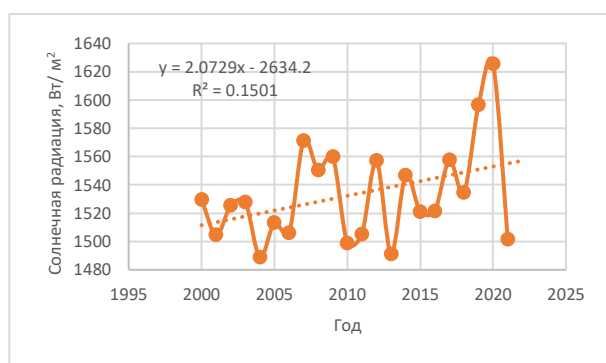
(b)



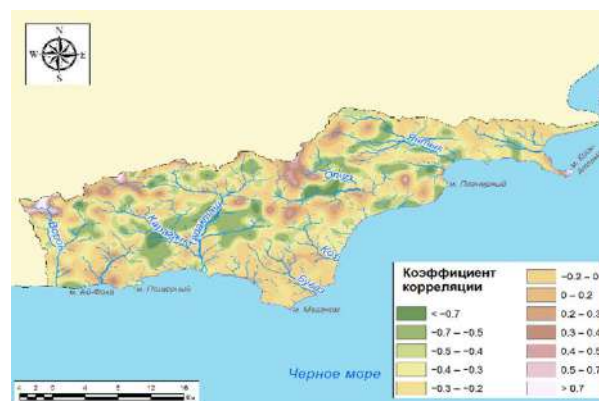
(c)



(d)



(e)



(f)

Рисунок 4.8 Связь между температурой воздуха, количеством выпадающих осадков, солнечной радиацией и NDVI: (а) динамика изменения среднегодовых значений температуры воздуха в Юго-Восточном Крыму; (б) коэффициент корреляции между среднегодовыми значениями NDVI и температуры воздуха; (с) динамика изменения среднегодового количества выпадающих осадков в Юго-Восточном Крыму; (д) коэффициент корреляции между среднегодовыми значениями NDVI и количеством выпадающих осадков; (е) динамика изменения среднегодовых значений солнечной радиации в Юго-Восточном Крыму; (ф) коэффициент корреляции между среднегодовыми значениями NDVI и поступлением солнечной радиации.

Как видно из рисунка 4.8, в Юго-Восточном Крыму наблюдается рост температуры воздуха и поступления солнечной радиации и незначительное сокращение количества выпадающих осадков. Наблюдается высокий коэффициент корреляции между значениями количества осадков и значениями NDVI. Коэффициенты корреляции между значениями NDVI и температурой воздуха, NDVI и количеством солнечной радиации характеризуются как среднезначимые.

4.7. Некоторые теоретические аспекты исследования ландшафтных стратегий

Исследование изменения растительности является чрезвычайно важной задачей, так как растительный покров реагирует одним из первых на многие реакции окружающей внешней среды. Особенно это важно исследовать в регионах, в которых произрастают леса, как один из ценнейших ресурсов для

развития различных сфер деятельности. Для Юго-Восточного Крыма в целом и в пределах основных растительных сообществ впервые проанализирована динамика NDVI и рассчитаны значения индекса Херста.

В отличие от ряда опубликованных работ (Kang et al., 2021; Han et al., 2022; Wang et al., 2023) в пределах Юго-Восточного Крыма не наблюдается больших различий амплитуд в диапазоне значений NDVI. Это связано в первую очередь с меньшей площадью исследования по сравнению с регионами, описываемыми в работах (Fan et al., 2015; Wang et al., 2023) и большой долей покрытия естественной растительностью в отличие от регионов с сильно контрастным и отсутствующим растительным покровом.

Несмотря на тот факт, что исследованию динамики NDVI для территории Крымского полуострова и его частей посвящены отдельные работы (Luryan et al., 2019; Tabunshchik, 2019; Shadchinov, 2021), Юго-Восточный Крым мало исследован. Стоит также отметить, что имеются работы по оценке динамики растительности (Gorbunov, 2020). D. Fan et al. (2020) приводят расчеты изменения NDVI и его изменения для Крымского полуострова в рамках изучения изменений растительности в районе инициативы «Один пояс – Один путь» с 1982 по 2015 гг., но сравнить эти данные с полученными нами не предоставляется возможным с силу разных пространственных масштабов исследования.

Если говорить о сравнении полученных значений индекса Херста для Юго-Восточного Крыма с другими регионами мира, то можно сказать, что, как и в Тибетском автономной районе (Китай) (Wang et al., 2023), во Внутренней Монголии (Китай) (Kang et al., 2021) превалируют значения менее 0.5. В то же время, значения индекса Херста (<0.4) показали, что в пределах пушистодубовых лесов в пределах Карадагского заповедника наблюдаются отдельные очаги сильной антиустойчивости, что подтверждается в ранее опубликованных нами данных (Gorbunov et al., 2022). В противовес этому, очаги неустойчивости тяготеют в большинстве своем к границам урбоценозов населенных пунктов, что связывается в первую очередь с негативным

воздействием антропогенной деятельности. В целом исследование динамики изменения и трендов изменения NDVI позволяет выявить наиболее и наименее подверженные изменениям земли и лесные ландшафты. В тоже время имеются некие сложности с выделением классов и границ, по сравнению с ранее опубликованными работами (Han et al., 2022; Jiang et al., 2022). Так в нашем исследовании мы можем использовать не все варианты классификации, представленные в (Han et al., 2022; Jiang et al., 2022).

Наибольшие значения корреляции между растительным покровом и количеством выпадающих осадков, температурой воздуха и количеством солнечной радиации характерны для лесных ландшафтов, что связано с наиболее благоприятными условиями произрастания лесов. В тоже время пушистодубовые леса находясь на границе ареала своего существования испытывают негативные пессимальные условия внешней среды и не могут формировать полный бонитет с наиболее обильным значением зеленой фитомассы. Это частично подтверждает предположения, высказанные в работах (Научно-прикладные основы создания..., 2000; Современные ландшафты Крыма..., 2009), о том, что в Горном Крыму, где преобладают лесные ландшафты, сформировано ядро наиболее ценных лесов находящихся в оптимальных условиях существования в пределах Крымского полуострова и по мере отдаления от Горного Крыма начинают преобладать пессимальные условия внешней окружающей среды, что неблагоприятно сказывается на лесных ландшафтах.

В тоже время, полученные нами данные тесно связаны с данными, полученными Han et al. (2022) в провинции Аньхой (Китай) о том, что за рассматриваемый период рубеж 2014–2015 года является моментом, когда происходит смена направленности трендов изменения значений NDVI. Однако, если Han et al. (2022) связывают это с ростом катастрофических природных явления (особенно оползней и лавин), для территории Юго-Восточного Крыма это не характерно. Здесь большую силу играют фактор антропогенного воздействия и глобальные циркуляционные процессы.

Мы исходим из предположения, что, рассматривая регион, покрытый растительностью, значения NDVI не могут быть отрицательными (как для водной поверхности) и мы можем анализировать средние значения. В тоже время, из-за ограничений размера пикселя исходного космического снимка мы понимаем, что в него могут попадать водные объекты, которые также подвержены изменению границ в результате природных и антропогенных факторов, что особенно актуально для Крымского полуострова (Shinkarenko et al., 2021). Однако, в исследуемом регионе влияние на расчет значений показателя NDVI незначительно, так как регион относится к вододефицитным (Gorbunov et al., 2022) и имеет большое количество природных ландшафтов, в которых отсутствуют как природные водные объекты, так и созданные в результате антропогенной деятельности. Показанный в разделе 3.1 анализ среднегодовых значений NDVI не дает четкого представления о тенденциях изменений и необходимо использовать более сложные показатели для оценки изменения растительного покрова. Как показал расчет значений индекса Херста и прогноз тренда изменений – эти показатели хорошо справляются с поставленной задачей. Таким образом, индекс Херста является полезным инструментом для анализа будущих изменений в региональном NDVI. Он позволяет определить степень устойчивости или антиустойчивости будущих тенденций и помогает предсказывать долгосрочные изменения в растительном покрове.

Вопрос о выборе ведущего фактора или комплекса факторов, которые влияют на произрастание растительности в пределах того или иного исследуемого региона является важной и до сих пор не решенной проблемой. Очевидно, что рассмотренные нами климатические факторы – температура, количество осадков и поступление солнечной радиации – вносят весомый вклад в функционирование отдельных сообществ в Юго-Восточном Крыму, но не являются единственными. Перспективным направлением исследований выступает поиск и анализ различных факторов внешней среды, оказывающих влияние на функционирование растительных сообществ. Чрезвычайно

актуальным является использование для этих целей концепции многомерной экологической ниши в трактовке G. E. Hutchinson (1957). В то же время, наш анализ исследовал исключительно влияние трех климатических факторов на изменение растительности. Учитывая сложное воздействие климатических переменных на развитие и функционирование ландшафтов, крайне важно, чтобы будущие исследования включали в себя более обширный набор внешних факторов. Это расширение должно охватывать не только климатические переменные, но также различные другие элементы внешней среды.

Если подходить к вопросу о выборе вегетационных индексов пригодных для оценки динамики растительного покрова, то использование NDVI имеет гораздо большее применение и использование по сравнению с другими вегетационными индексами. Выбор вегетационного индекса NDVI был обусловлен в первую очередь его широким использованием и возможностью сравнения получаемых исследователями данных между собой. Большинство исследователей отмечают (Yang et al., 2019; Han et al., 2022; Jiang et al., 2022), что NDVI может лучше отражать состояние роста растительности с ее высокой чувствительностью к растительности; поэтому он обычно используется в качестве эффективного оценочного индекса для мониторинга региональных ландшафтов. P. Li et al. (2021) говорят о том, что среди всех вегетационных индексов NDVI имеет хорошую корреляцию с чистой первичной продуктивностью растительности (NPP), площадью покрытия полога и биомассой, что в свою очередь позволяет использовать его для точного отражения и оценки состояния роста растительности и широко используется в исследованиях динамики региональной растительной.

В тоже время существует большое количество вегетационных индексов, которые могут быть рассчитаны на основе данных космической съемки. Например, Ratio Vegetation Index (RVI) (Jordan, 1969), Infrared Percentage Vegetation Index (IPVI) (Crippen, 1990), Transformed Vegetation Index (TVI) (McDaniel, Haas, 1982) при расчетах связаны с NDVI так как используют в

своих расчетах те же каналы космических снимков что и NDVI и рассматривать их самостоятельно в отличие от NDVI не имеет смысла. Одно из преимуществ NDVI состоит в том, что его значения изменяются от -1 до 1 , в отличие от Ratio Vegetation Index (RVI) (Jordan, 1969), Difference Vegetation Index (DVI) (Richardson, Everitt, 1992) имеющих неограниченную размерность и сложность дальнейшего сравнения и интерпретации получаемых данных.

A. Huete et al. (1985), C.D. Elvidge and R.J. Lyon (1985) показали, что почвенный покров сильно влияет на вегетационные индексы. Однако, в тоже время, нужно понимать, что абсолютно все вегетационные индексы чувствительны к влиянию почвенного покрова и открытых участков без растительности. Для рассматриваемого пикселя изображения NDVI может рассчитываться и включать почву и водные объекты. Однако при увеличении растительности в пределах этого пикселя возрастает и значение NDVI, так как растительность покрывает участки почвы или появляется на месте бывших водных объектов. Существуют также вегетационные индексы, которые учитывают влияние почвенного и поверхности земли. К таким вегетационным индексам относятся – Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (TSAVI) (Baret et al., 2005), Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI) (Qi et al., 1994), Enhanced Vegetation Index (EVI) (Huete et al., 2002). Однако, их применение ограничивается в регионах с богатым растительным покровом, в том числе к которым относится исследуемый регион. Это объясняется невозможностью четко провести выделение почвенных констант (почвенных линий), которые подробно описываются в работе (Kauth et al., 1976). В этом случае самым лучшим будет использование NDVI, так как он лучше всего работает в областях с обильной растительностью, к которым относится Юго-Восточный Крым. Использование вегетационного индекса EVI было рассмотрено нами на подготовительном этапе работ, однако он содержал большое количество ошибок, что не позволило включить его в исследование. В тоже время значения EVI как показано в работе (Shibani et al., 2023) не коррелируют с другими значениями вегетационных индексов (в частности, с

NDVI). Расчет вегетационного индекса EVI показал его большую чувствительность к рельефу, а учитывая, что изучаемый район обладает сложным пересеченным рельефом, то это приводило к большим ошибкам (Matsushita et al., 2007).

Использование вегетационных индексов с корректировкой на влияние почвенного покрова требует учета региональных особенностей, а также введения различных поправочных коэффициентов, которые не могут быть одинаковыми для всех ячеек растра, в силу неоднородности почвенного и наземного покрова. В силу этого именно использование NDVI показывает наилучшие результаты для Крымского полуострова в целом и Юго-Восточного Крыма в частности (Горбунов, 2022; Вечерков и др., 2023; Tabunshchik, 2019). Влияние почвенных особенностей на локальном и региональном уровне исследований требует больших трудозатрат и времязатрат на проведение исследований по полевым и лабораторным исследованиям спектров почв. Подобные работы особенно часто проводятся для корректировки глобальных моделей и выявления региональных особенностей в различных науках, которые используют данные дистанционного зондирования Земли (Wu et al., 2019; Skorokhod et al., 2021).

Еще одним важным аспектом, который следует учитывать при анализе изменений значений NDVI и расчете индекса Херста, является преобразование временных рядов в стационарную форму. Это было необходимо из-за того, что одним из наиболее широко используемых методов расчета индекса Херста является анализ R/S. Как указано в работе M. Höll et al. (2016), в реальных данных мира природы часто содержатся встроенные тренды, которые делают временной ряд нестационарным, что делает анализ R/S неприменимым. Это происходит потому, что анализ R/S может быть применен к рядам, которые обладают определенной стационарностью по среднему значению (Kantelhardt, 2012). Кроме того, как указано в работе (Crevecœur et al., 2010), важно учитывать, что для расчета индекса Херста длина наблюдательного ряда должна включать как минимум 256 измерений.

Еще одним из ограничений исследования выступает скудность данных и климатических характеристиках в пределах Юго-Восточного Крыма и сложности с их геопространственной обработкой. Мы полностью согласны с W. Han et al. (2022), которые указывают на тот факт, что при использовании различных методов интерполяции климатических данных могут быть получены различные растры полей значений климатических факторов.

Также нужно понимать, что в дальнейшем возможно использовать более детальные космические снимки с более крупным разрешением (Sentinel-2 с разрешением 10 м/пиксель) в отличие от использованных в работе MODIS. Однако, использование космических снимков MODIS продиктовано в первую очередь их широким пространственно-временным охватом, при более худшем разрешении. В дальнейшем, при росте частоты съемок различных спутников необходимо стремиться детализировать частоту получаемых данных и получать более качественные данные. Однако при этом, должно быть улучшено качество предоставляемых открытых климатических данных, которые на данный момент пространственно сопоставимы только с космическими снимками MODIS.

4.8. Прогноз динамики структуры растительного сообщества

Тема изменения климата и глобального потепления широко обсуждается обществом и научным сообществом как одно из самых актуальных направлений научно-технической деятельности. Согласно сформулированным сценариям изменения выбросов углерода и повышения температуры воздуха до конца XXI века с помощью модели были спрогнозированы показатели динамики растительности и их характеристик на локальном уровне.

Первый сценарий предусматривает реализацию природоохранных мер при которых концентрация углерода в атмосферном воздухе не поднимется выше установленной нормы, а среднее значение повышения температуры через столетие равно 1,5 °C.

Второй сценарий характеризуется небольшим увеличением содержания углерода в атмосферном воздухе до 420 ppm, и среднее значение повышение температуры равно 1,8 °С.

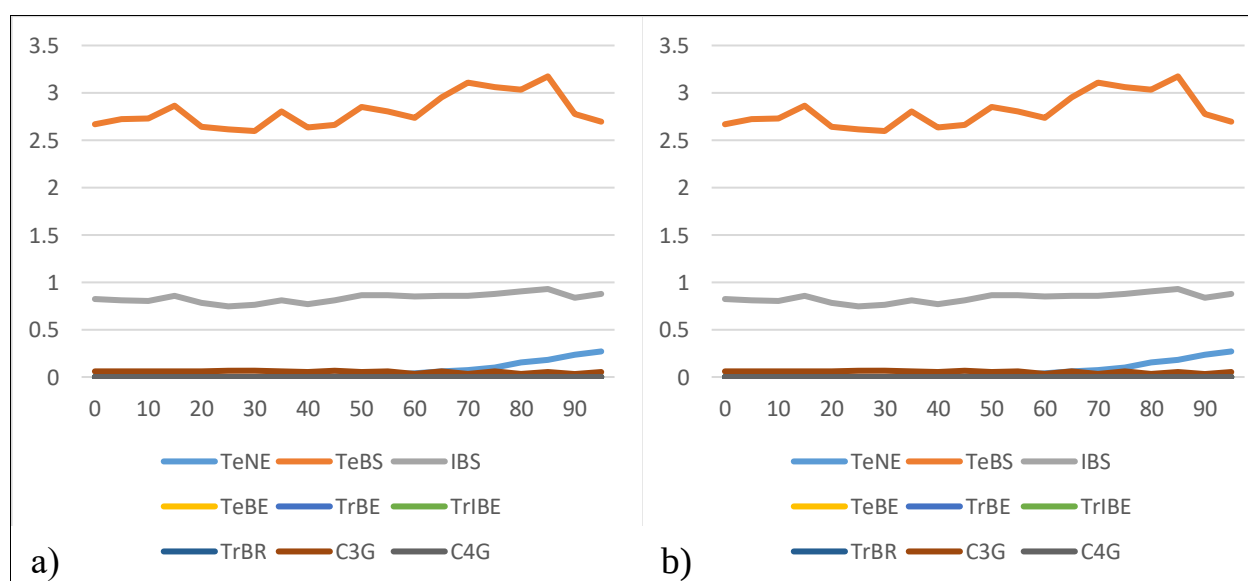
Третий сценарий подразумевает концентрацию углерода в атмосферном воздухе около 600 ppm, а среднее значение повышение температуры равно 2,7 °С.

Четвертый сценарий характеризуется значительным увеличением концентрации углерода в атмосферном воздухе до 850 ppm, а среднее значение повышение температуры равно 3,8 °С.

Пятый сценарий прогнозирует максимальные концентрации углерода в атмосферном воздухе около 1150 ppm, а среднее значение повышение температуры равно 4,8 °С.

4.8.1 Пушистодубовый лес

Согласно полученным результатам основную долю биомассы во всех сценариях занимает пушистодубовый лес (TeBS), так же отмечается граб (IBS), а другие породы и травянистая растительность (C3G) в перерасчете на всю площадь ландшафта распространены слабо (Рис. 4.9а). В начале прогнозируемого периода отмечается наличие только данных трех функциональных типов растений и по мере повышения температуры, согласно прогнозам, будут появляться и другие представители (Рис. 4.9е).



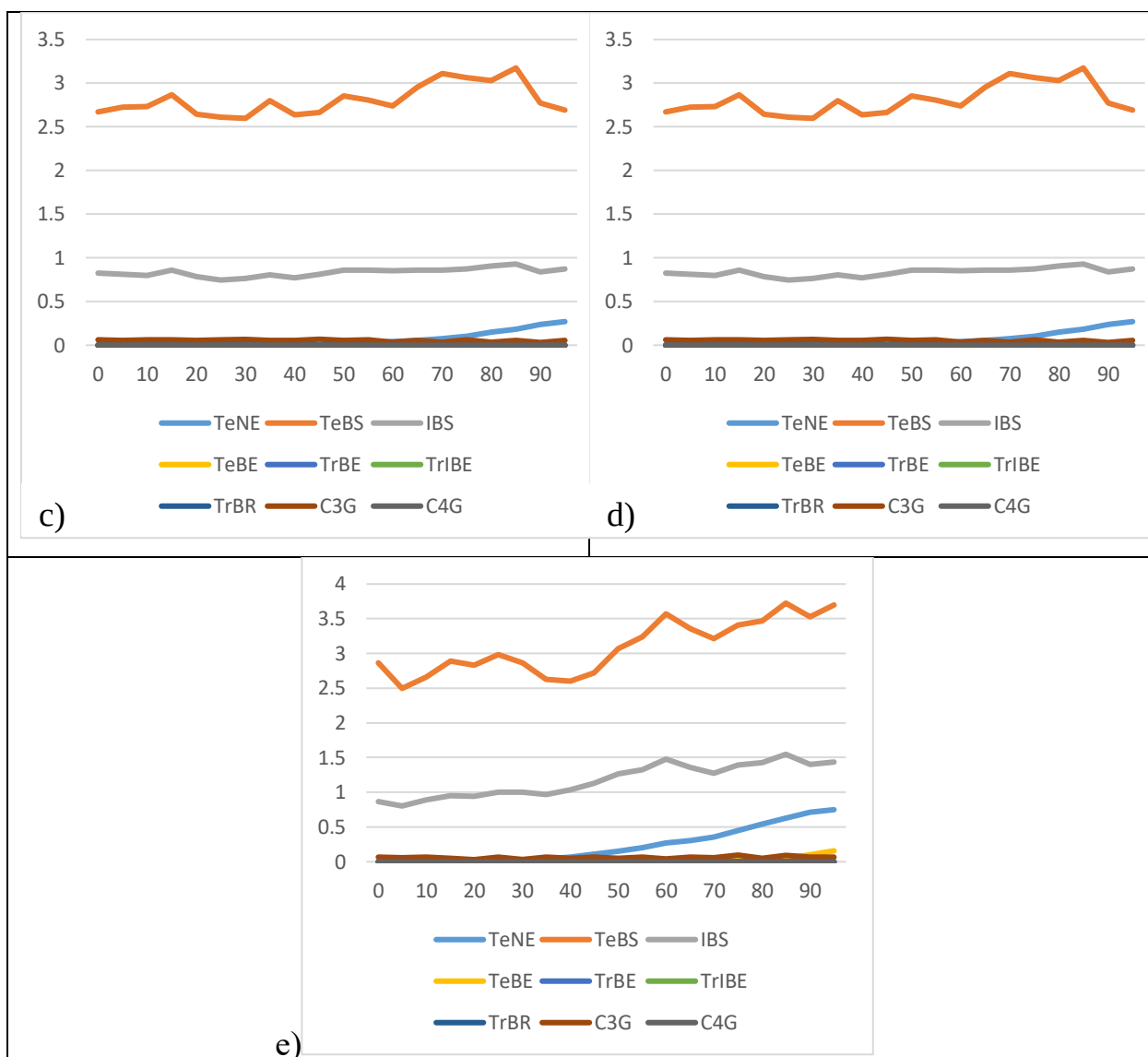


Рисунок 4.9. Количество прогнозируемой биомассы(С) категорий растений по: а) первому сценарию, б) второму сценарию, с) третьему сценарию, d) четвертому сценарию, е) пятому сценарию, кг/м^2

В первых трех сценариях в целом количество прогнозируемой биомассы дуба пушистого (TeBS) не имеет значительных изменений, при этом в четвертом сценарии наблюдается значительный рост биомассы до 4 кг/м^2 через 50 лет и дальнейшую стабилизацию около значения $3,5 \text{ кг/м}^2$. В пятом сценарии отмечается постепенный рост значений на протяжении всего прогнозируемого периода до $3,8 \text{ кг/м}^2$.

Для динамики биомассы граба (IBS) характерна схожая картина, отсутствие изменений по первым трем сценариям, значения около 1 кг/м^2 . В

четвертом сценарии повышение значений с дальнейшей стабилизацией, и плавный рост в пятом сценарии до 1,5 кг/м².

Группа TeNE в рассматриваемом сообществе представлена единичными деревьями можжевельника высокого, встречающиеся и в настоящий момент, при этом во всех сценариях с увеличением температуры наблюдается плавный рост биомассы данной группы растений. Чем выше поднимается температура, тем быстрее и сильнее идет данное увеличение. Так при первом сценарии TeNE начнет заметно развиваться через 70 лет и к концу периода достигнет отметки 0.3 кг/м², а уровень потепления пятого сценария приводит к развитию через 40 лет до 0,8 кг/м².

Помимо представленных основных групп в пятом сценарии к концу прогнозируемого периода наблюдается начало увеличения категории TeBE – широколиственных вечнозеленых деревьев. В Крыму единственным представителем данного типа деревьев является земляничник мелкоплодный, который на данный момент встречается только на южных склонах Южного берега Крыма (ЮБК). Основным регулирующим его фактором является температура, и ее увеличение на выбранном ключевом участке на 4,5° С позволит расширить его ареал распространения.

Для описания основных путей перемещения углерода в ландшафте в модели используются показатели первичной продукции (NPP) растительности, гетеротрофное дыхание почвы, выбросы пожаров и естественный экосистемный обмен (NEE), где отрицательные значения представляют собой приток в ландшафт, положительные значения – выброс в атмосферу. Таким образом единственным источником поступления углерода в ландшафт является первичная продукция растений, остальные три показателя характеризуют выбросы углерода в атмосферу (рисунок 4.10).

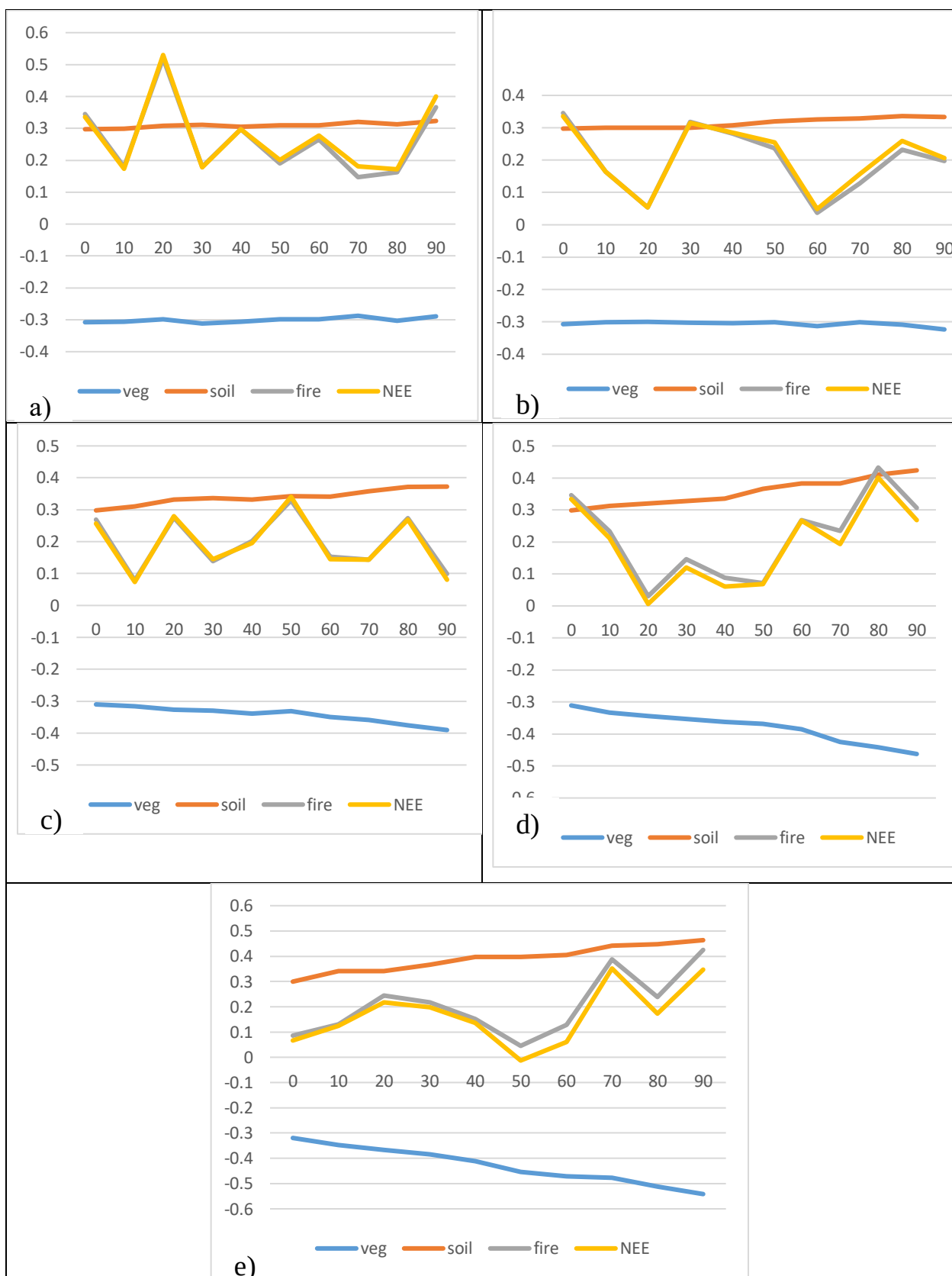


Рисунок 4.10 Перемещение углерода растительностью, почвой, пожарами и во время естественного экосистемного обмена (NEE) по: а) первому сценарию, б) второму сценарию, с) третьему сценарию, d) четвертому сценарию, е) пятому сценарию, кг/м^2 в год.

Первичная продукция в условиях первых двух сценариев остается неизменной, но при более существенном увеличении температуры происходит постепенное увеличение данного показателя. При этом при потеплении в среднем на $2,7^{\circ}\text{C}$ (третий сценарий) продуктивность увеличивается на $0,1\text{ кг/м}^2$ в год за прогнозируемый период, а при $4,8^{\circ}\text{C}$ – на $2,5\text{ кг/м}^2$ в год, что соответствует увеличению первичной продуктивности практически в двое за 100 лет.

Поглощение углерода почвой во всех случаях преобладает над другими путями перемещения углерода. При значении на базовом уровне $0,3\text{ кг/м}^2$ в год в каждом сценарии отмечается его увеличение при повышении температуры от $0,02\text{ кг/м}^2$ в год при первом сценарии до $1,6\text{ кг/м}^2$ в год при пятом.

Перемещение при пожарах и естественного экосистемного обмена практически идентичны и носят крайне неравномерный характер, явное увеличение данных параметров отмечается только при значительном потеплении в четвертом и пятом сценарии.

Прогнозные значения перемещения воды на выбранном ключевом участке в рамках заданных стратегий остаются стабильными на протяжении всего прогнозируемого периода вне зависимости от уровня потепления, а основной расход приходится на испарение. Общий поток включает в себя транспирацию, сток, испарение влаги, задерживаемой кронами, и испарение почвы, мм/год (рисунок 4.11).

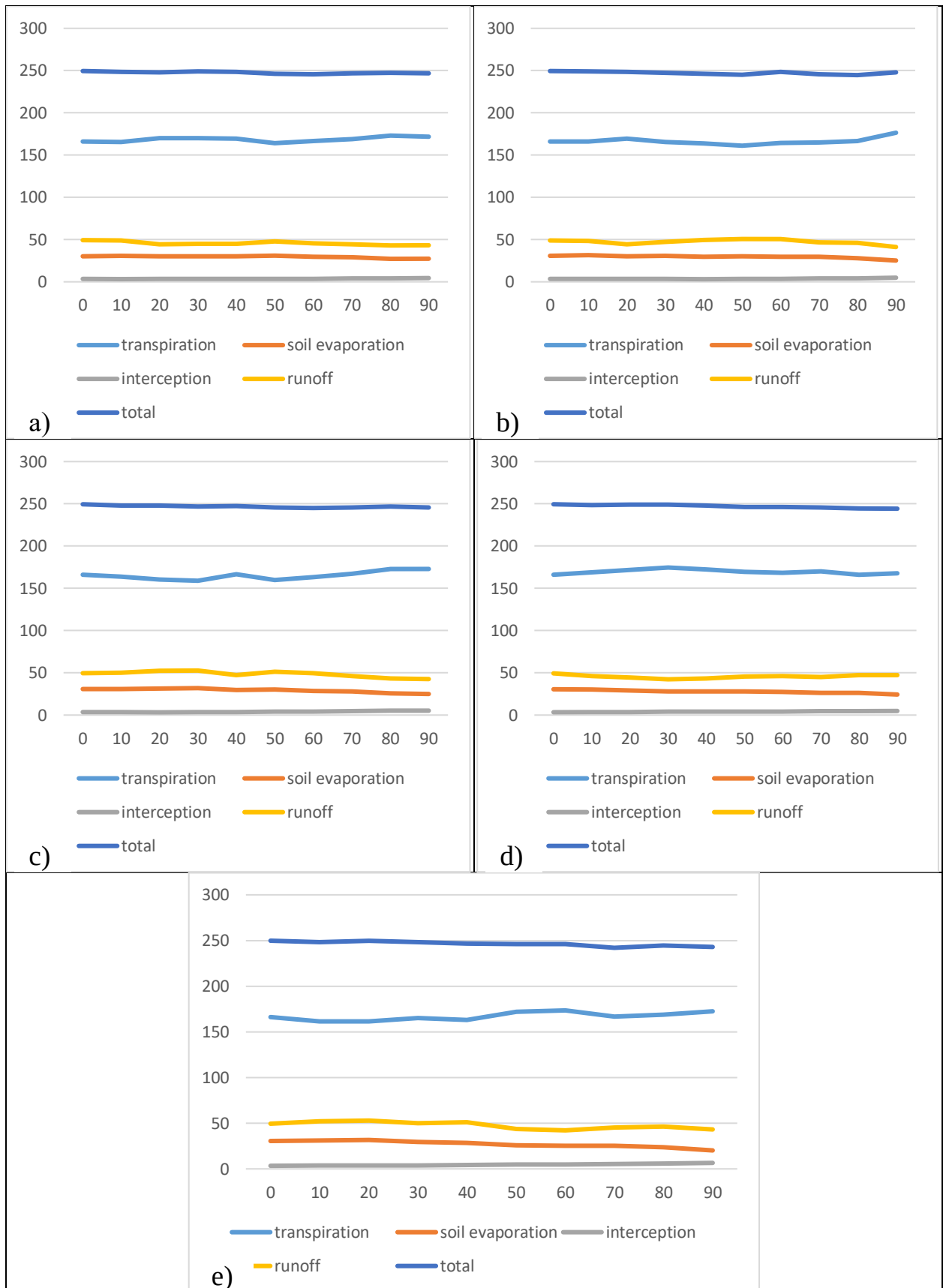


Рисунок 4.11 Перемещение воды в прогнозируемом растительном сообществе по: а) первому сценарию, б) второму сценарию, в) третьему сценарию, г) четвертому сценарию, е) пятому сценарию, мм/год

Для характеристики потенциальной фотосинтетической мощности растений и состояния растительного покрова рассчитывался индекс листовой пластины (LAI) для каждой группы растений (рисунок 4.12).

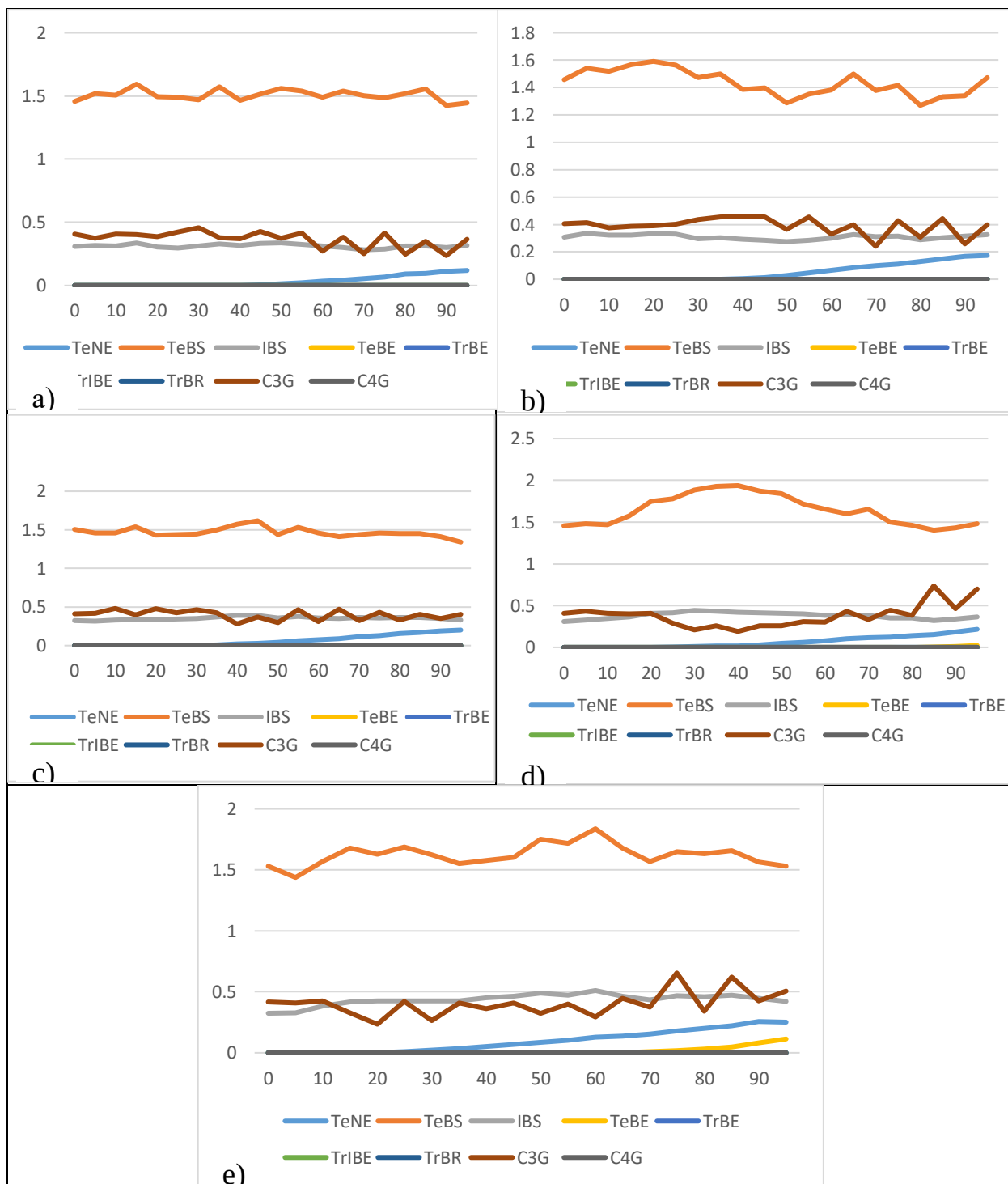


Рисунок 4.12 Индекс листовой поверхности (LAI) по: а) первому сценарию, б) второму сценарию, с) третьему сценарию, d) четвертому сценарию, е) пятому сценарию, m^2/m^2

Согласно полученным данным индекс LAI для дуба пушистого (TeBS) при незначительных потеплении до третьего сценария остается в пределах 1,4-1,6 м²/м², при четвертом сценарии отмечается временное увеличение до 2 м²/м² через 40 лет с дальнейшим возвратом к первоначальному значению. В пятом прогнозе происходит постоянное увеличение значения индекса в районе 1,6-1,8 м²/м².

Похожая тенденция наблюдается и с грабом (IBS) первые три прогноза сохраняют первоначальные значения, а в третьем происходит увеличение в среднем на 0,05 м²/м², с повышением температуры увеличивается и значение индекса на 0,1 м²/м² в четвертом и 0,15 м²/м² в пятом сценарии.

Повышение средних температур позволит в перспективе распространиться можжевельниковому сообществу и возможным аналогам (TeNE) от случайных единичных деревьев до более стабильного сообщества. А скорость данного процесса напрямую зависит от степени потепления и может занимать от 40 лет по первому сценарию до 20 – по пятому.

Таким же образом на данной территории при максимально прогнозируемом повышении температуры могут появиться представители группы тропических деревьев (TeBE), в нашем случае земляничник до 0,1 м²/м² к концу прогнозируемого периода.

Азот – жизненно важный элемент для растений, поскольку является составной частью белков и нуклеиновых кислот. Непосредственно из воздуха азот усваивают только некоторые бактерии, растения усваивают азот из почвы в виде его неорганических соединений. Что делает наблюдение за его круговоротом важной задачей (рисунок 4.13). Отрицательные значения представляют вклад, а положительные – потерю из ландшафта.

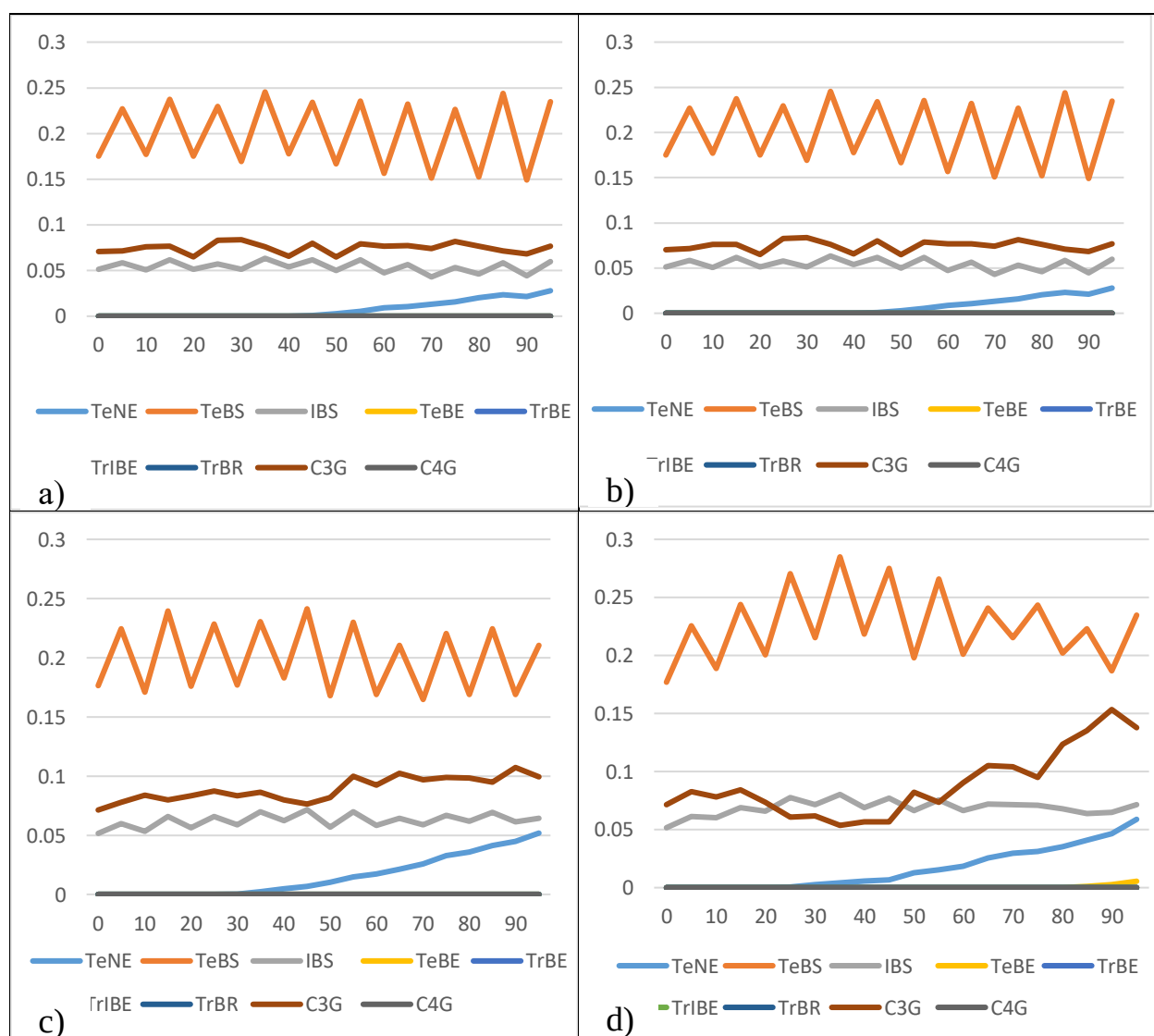
Таким образом привнесение азота происходит за счет фиксации его растениями и отложения в почве, а удобрение, эмиссия из почвы, выщелачивание и чистый поток либо выносят азот, либо не имеют особого вклада.



Рисунок 4.13 Перемещение N (кг/га в год) в прогнозируемом растительном сообществе по: а) первому сценарию, б) второму сценарию, в) третьему сценарию, д) четвертому сценарию, е) пятому сценарию

При рассмотрении динамики показателей в различных сценариях, изменения происходят только в значениях дыхания почвы и чистого потока азота. Во всех случаях их динамика имеет крайне неравномерный характер без явного тренда на увеличение или снижение. Только в пятом сценарии наблюдается некоторое общее увеличение.

Показатель первичной продукции позволяет охарактеризовать прирост количества органического вещества, образованного за определённое время автотрофными организмами, при этом он делится на валовую и чистую продукцию, соответствует количеству углерода, доступного растениям каждый год для распределения в новую биомассу. При этом чистая первичная продукция демонстрирует реальный прирост органического вещества без того количества продукции, которое было затрачено на дыхание (рисунок 4.14).



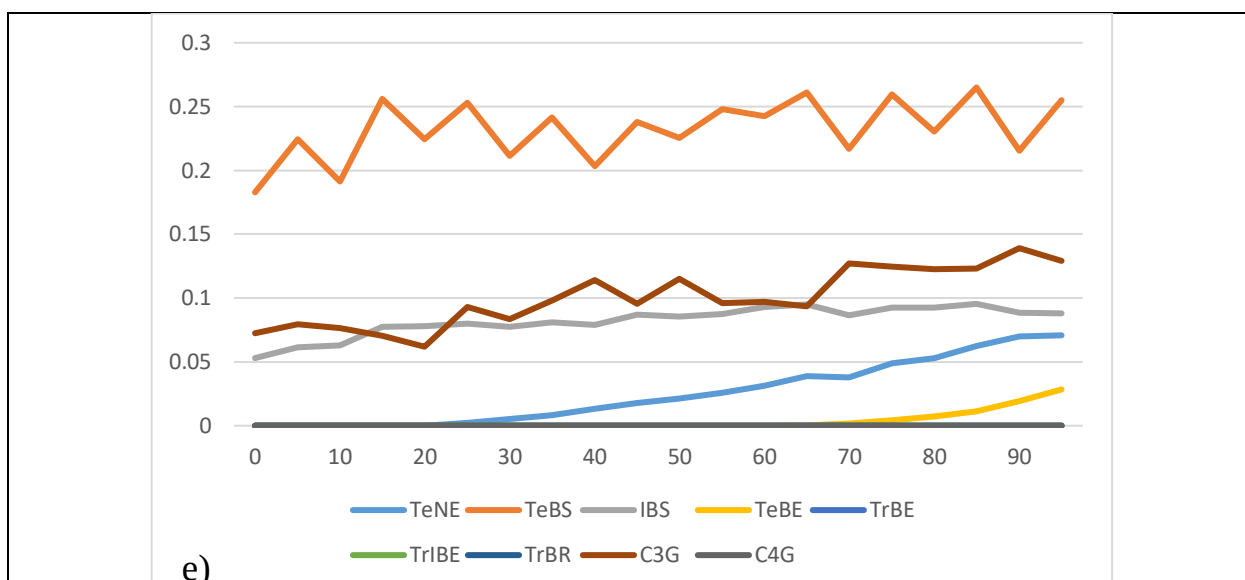


Рисунок 4.14 Чистая первичная продукция (кг/м^2 в год) в прогнозируемом растительном сообществе по: а) первому сценарию, б) второму сценарию, с) третьему сценарию, д) четвертому сценарию, е) пятому сценарию

При рассмотрении полученных результатов отмечается некоторая цикличность значений при сохранении того же характера изменения количества вещества по различным сценариям, что и показатель биомассы.

4.8.2 Можжевельный лес

При описании данного сообщества важно отметить, что прогнозы модели основываются исключительно на климатических условиях и не способны учесть локальные орографические особенности местности. Для рассматриваемого можжевельного сообщества необходимо учитывать расположение на практически 45° склоне южной экспозиции с небольшой мощностью почвенного покрова, что не способствует задержанию поступающей влаги в ландшафт и формирует условия для более ксерофитных пород деревьев и кустарников.

Таким образом необходимо учитывать невозможность произрастания группы TeBS на данном участке, который по климатическим условиям демонстрирует предпосылки развития рассматриваемого, в нашем случае, пушистодубового сообщества при благоприятных условиях (рисунок 4.15).

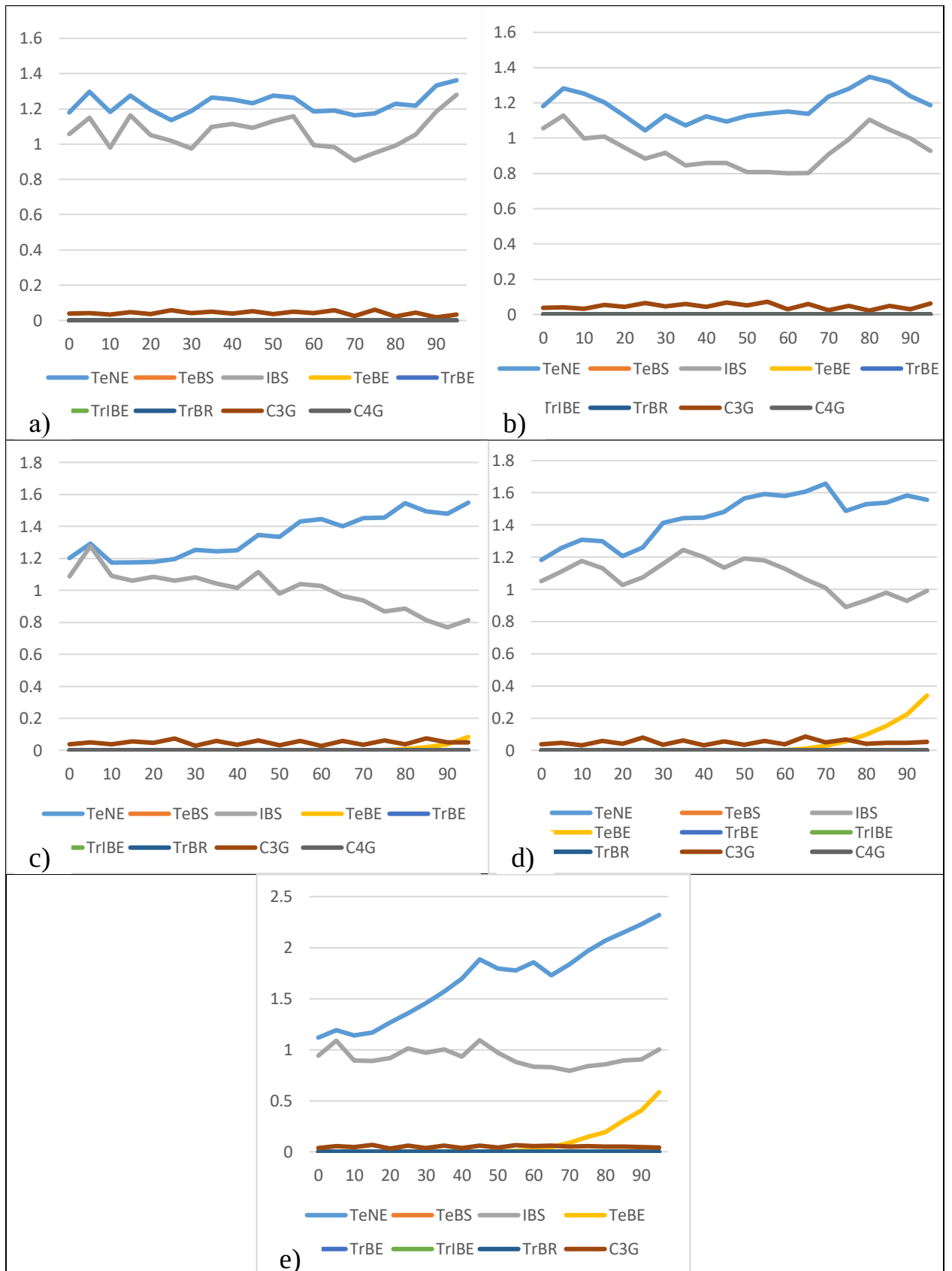


Рисунок 4.15 Количество прогнозируемой биомассы (C) категорий растений по: а) первому сценарию, б) второму сценарию, в) третьему сценарию, д) четвертому сценарию, е) пятому сценарию, кг/м²

Согласно полученным результатам основную долю биомассы занимает можжевельный лес (TeNE), а другие породы (TrBE) и травянистая растительность (C3G) в перерасчете на всю площадь ландшафта распространены слабо. Так же отмечается постепенный рост биомассы можжевельника в течение прогнозируемых ста лет, в то время как остальная растительность остается на том же уровне.

Первые три спрогнозированных сценария не прогнозируют существенных изменений, только в третьем к концу рассматриваемого периода в сообществе начнут встречаться представители растительной группы TeBE, представленные в Крыму земляничником мелкоплодным. С четвертого сценария становится заметен рост биомассы можжевельника на $0,2 \text{ кг/м}^2$ к концу периода, и более существенное включение в сообщество через 65 лет земляничника на $0,2 \text{ кг/м}^2$ к концу периода.

Пятый сценарий отличается гораздо большим ростом биомассы практически во всех представленных растительных групп, представленных в сообществе. Наибольший рост приходится на можжевельник и достигает до $0,9 \text{ кг/м}^2$, так же через 60 лет прогнозируется появление растительной группы TeBE. Также стоит отметить благоприятные условия для конкретно данного вида, что действительно позволит расширить его распространение при рассматриваемых сценариях потепления.

Также в пятом сценарии отмечается положительный тренд развития группы TeBS, что может позволить единично встречающимся дубовым деревьям распространиться при благоприятных условиях.

Аналогично прогнозируются основные пути перемещения углерода в экосистеме растительностью, почвой, пожарами и во время естественного экосистемного обмена (NEE) (рисунок 4.16).

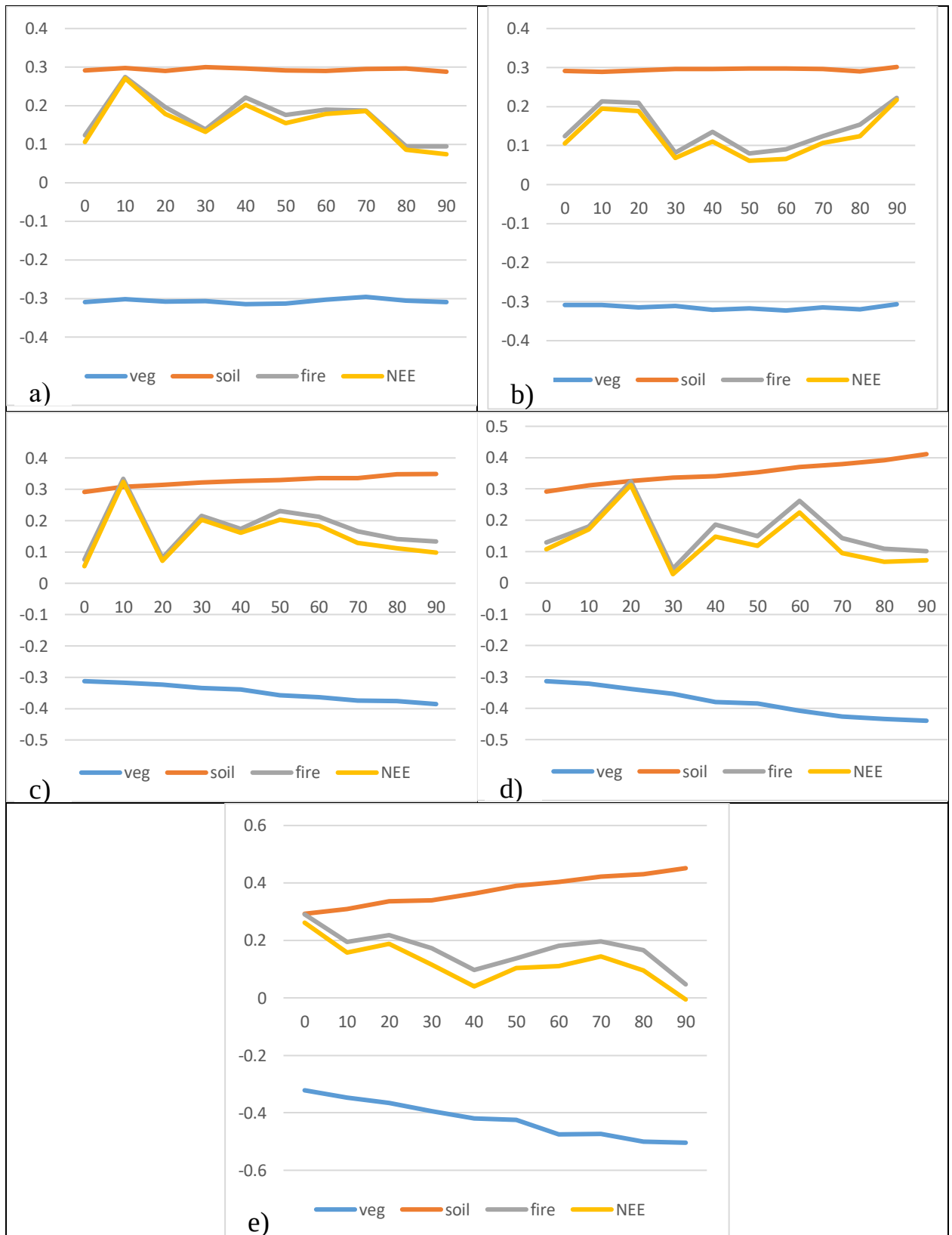
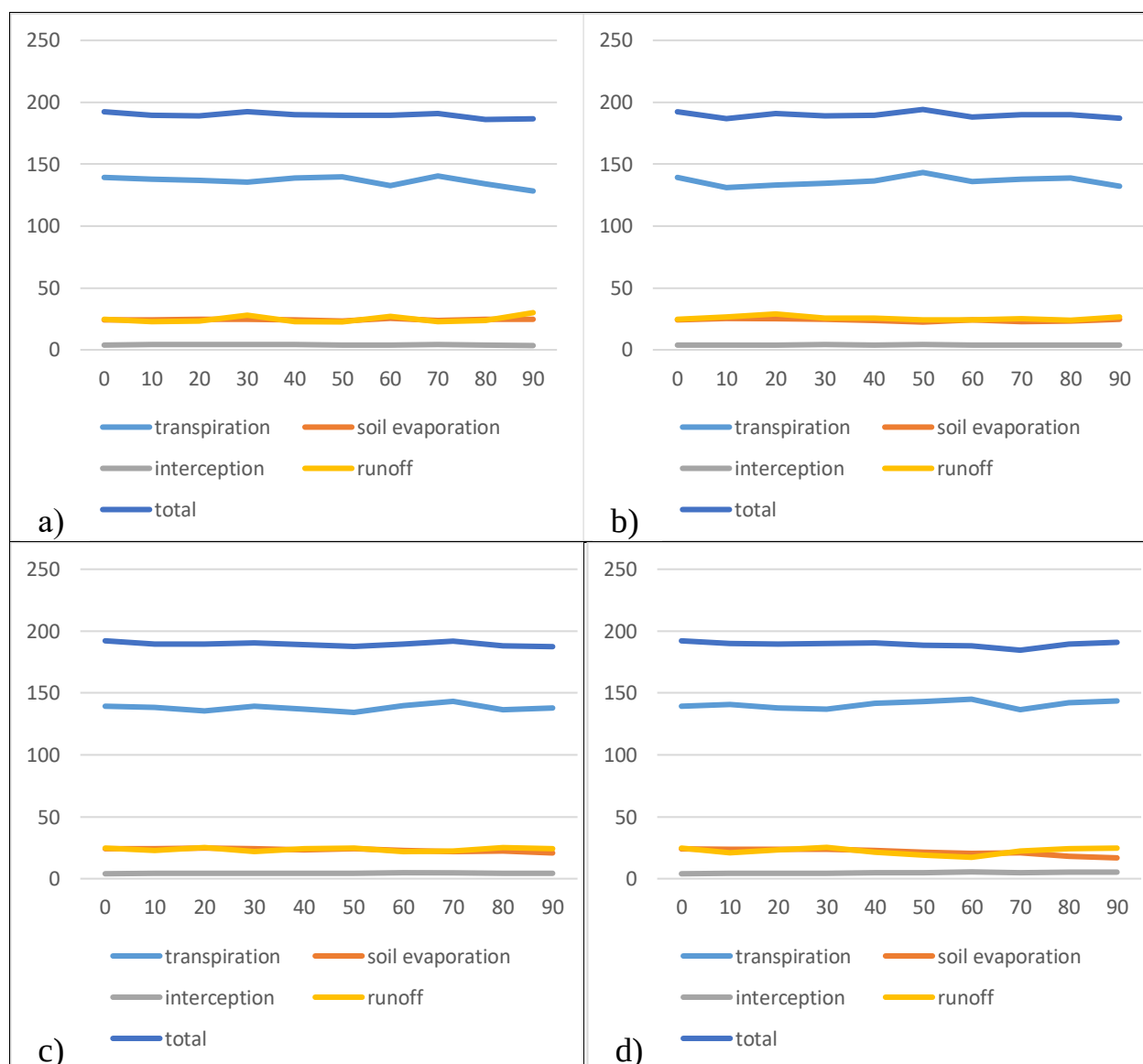


Рисунок 4.16 Перемещение углерода растительностью, почвой, пожарами и во время естественного экосистемного обмена (NEE) по: а) первому сценарию, б) второму сценарию, с) третьему сценарию, d) четвертому сценарию, е) пятому сценарию, кг/м^2 в год.

Перемещение углерода пожарами и естественным экосистемным обменом во всех пяти сценариях имеют неравномерный характер, в то время как поглощение почвой и продукция растений абсолютно зеркально увеличивают проходящий через них поток углерода от первого сценария к пятому.

Перемещение воды в рамках заданной стратегии остается стабильным на протяжении всего прогнозируемого периода, а основной расход приходится на испарение (рисунок 4.17).



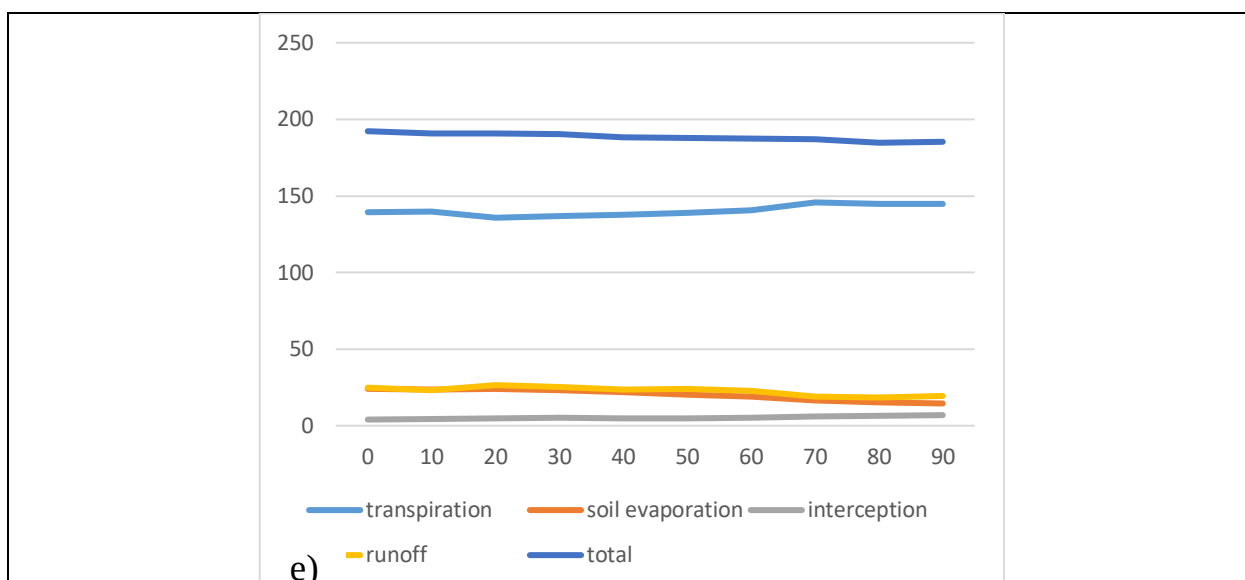


Рисунок 4.17 Перемещение воды в прогнозируемом растительном сообществе по: а) первому сценарию, б) второму сценарию, с) третьему сценарию, д) четвертому сценарию, е) пятому сценарию, мм/год

Общий поток включает в себя транспирацию, сток, испарение влаги, задерживаемой кронами, и испарение почвы. Все эти показатели незначительно колеблются в определенных пределах, что позволяет предположить, что глобальное потепление не влияет напрямую на общий круговорот воды.

Индекс листовой пластины также позволяет сформировать представление о распространении той или иной растительной группы. Однако группа TeNE не является широколиственной, и поэтому данный показатель не совсем репрезентативен в данном случае (рисунок 4.18).

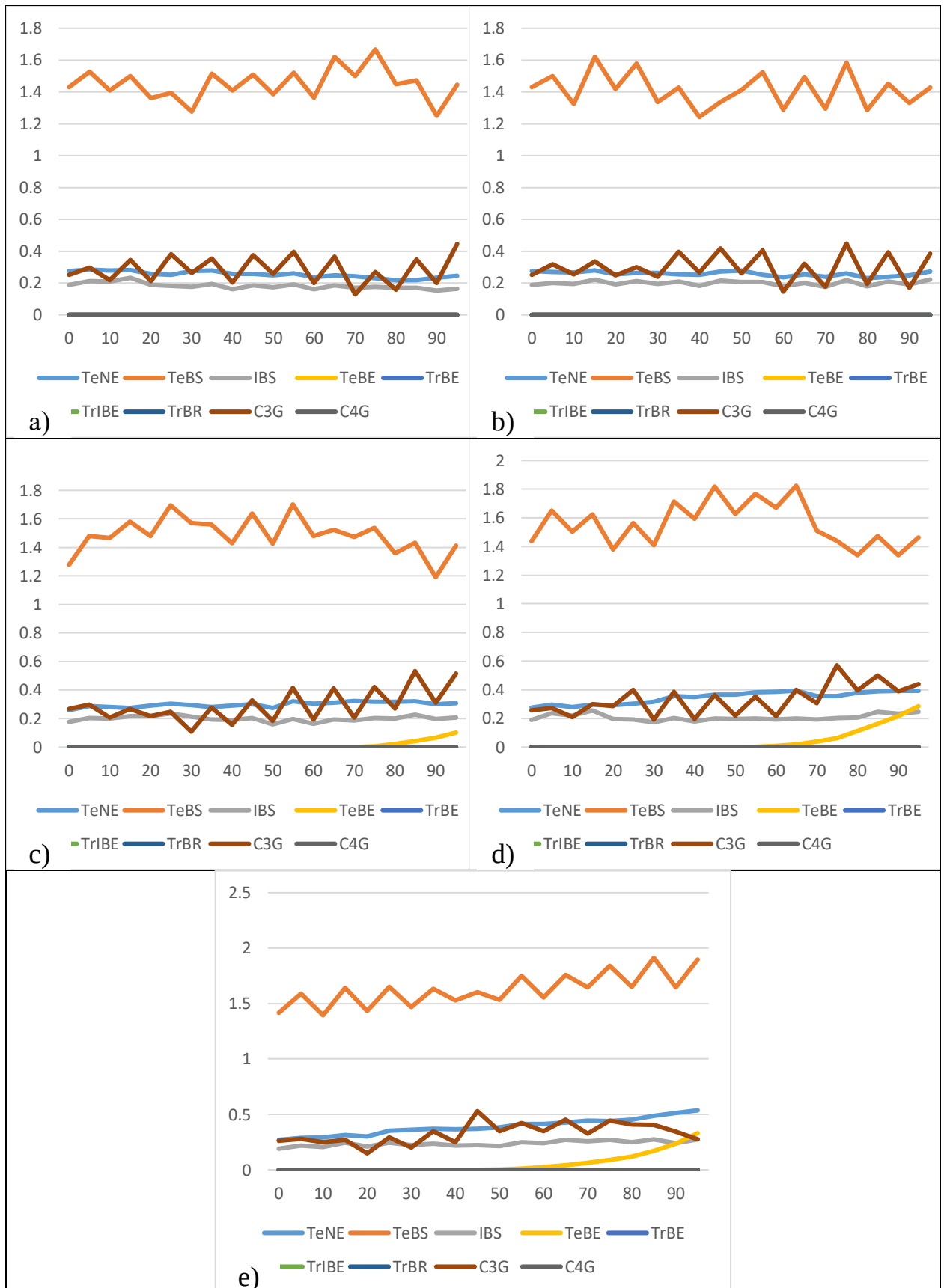
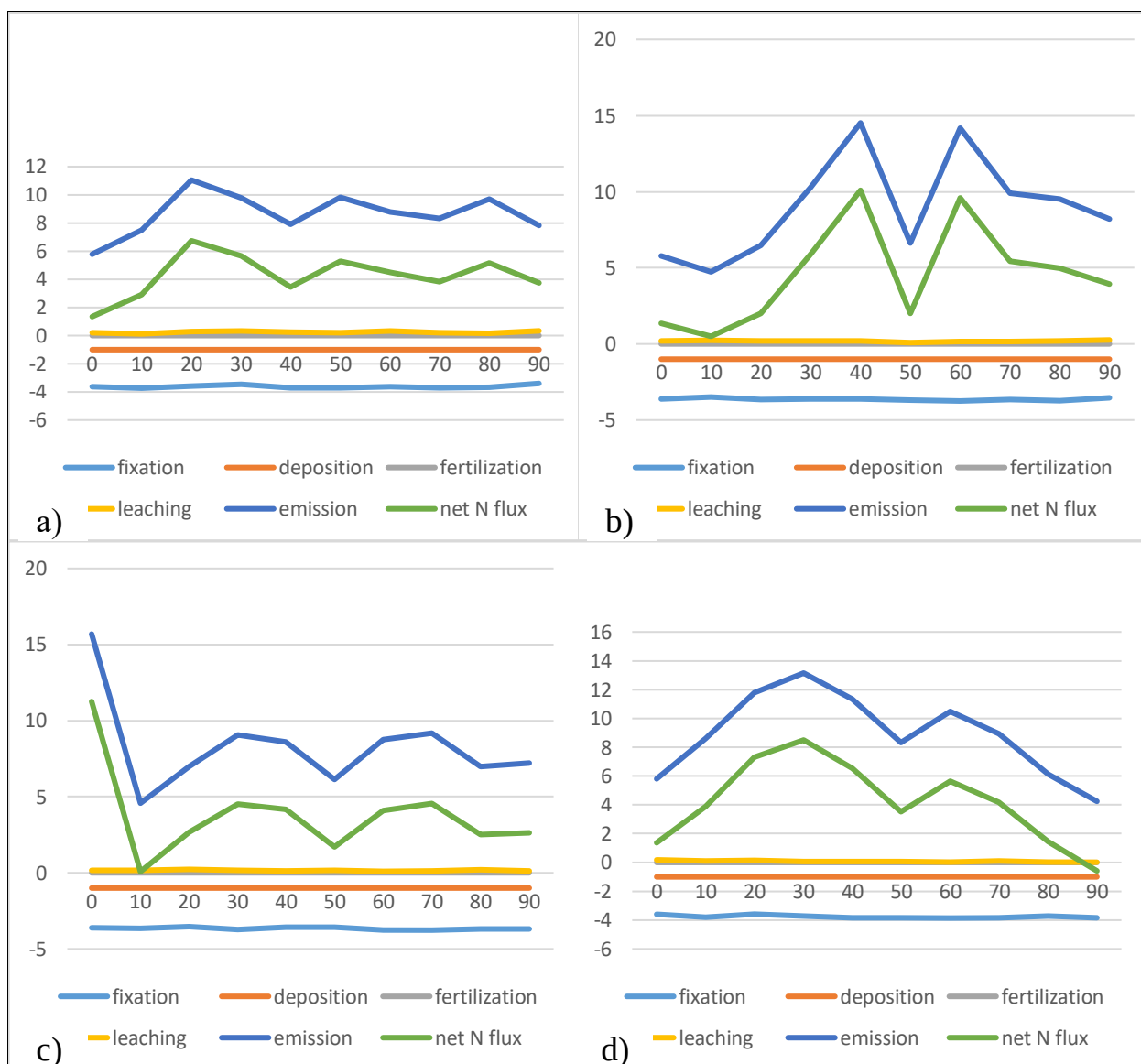


Рисунок 4.18 Индекс листовой поверхности (LAI) по: а) первому сценарию, б) второму сценарию, с) третьему сценарию, д) четвертому сценарию, е) пятому сценарию, $\text{м}^2/\text{м}^2$

В целом динамика и распределение значений индекса листовой поверхности повторяет показатели биомассы. При этом стоит отметить относительно высокое значение травянистой растительности по отношению к древесным породам.

Характер перемещения азота аналогичен данному показателю в пушистодубовом сообществе (рисунок 4.19).



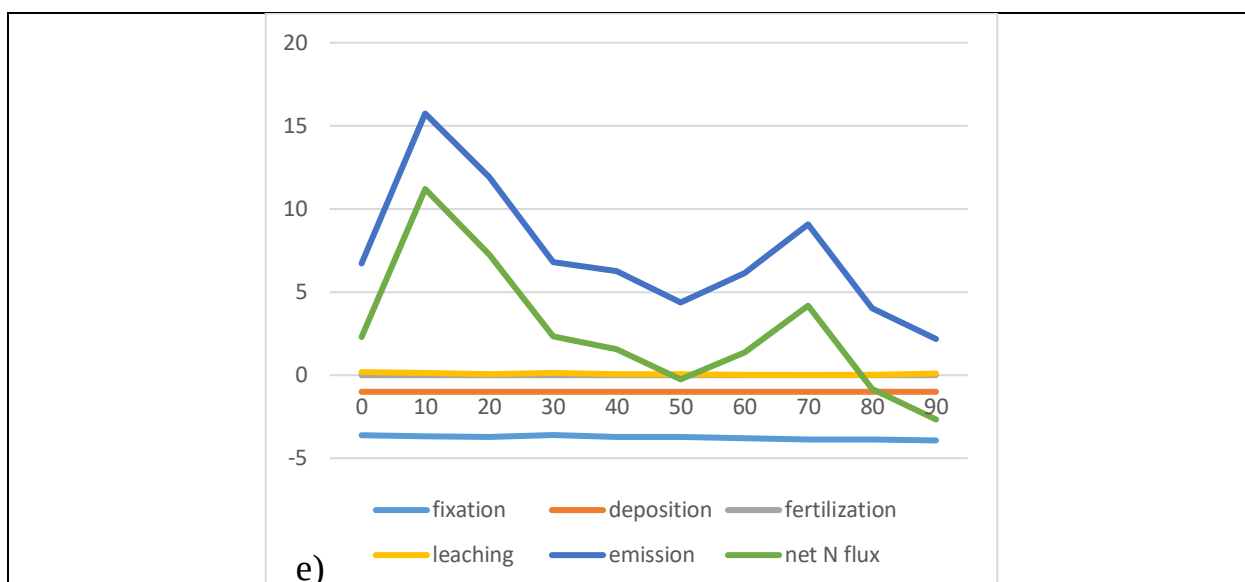
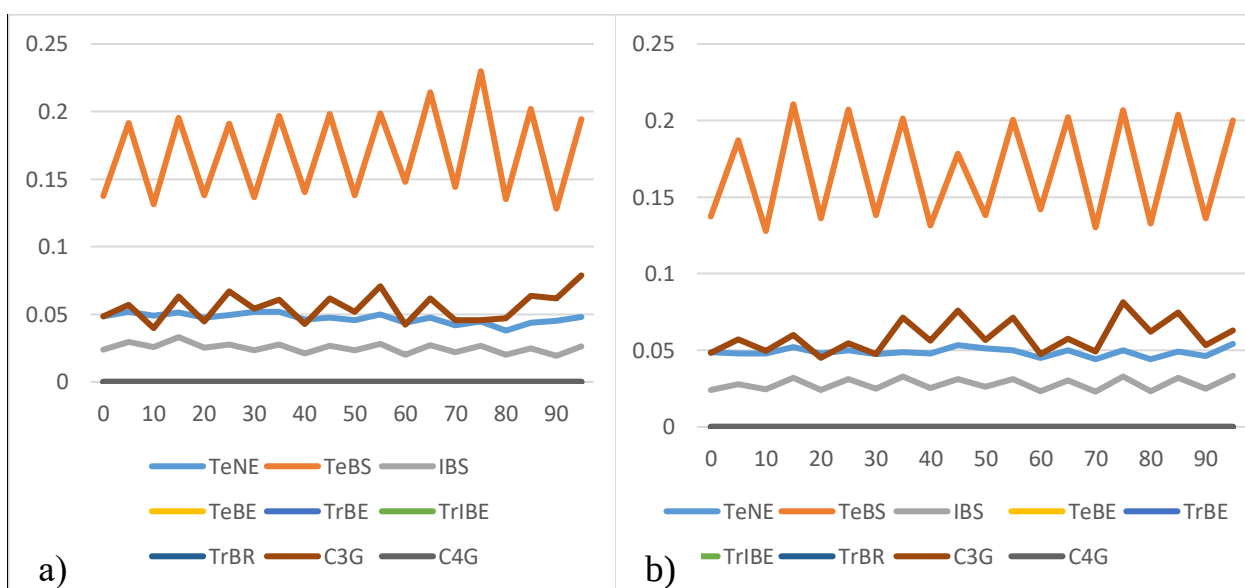
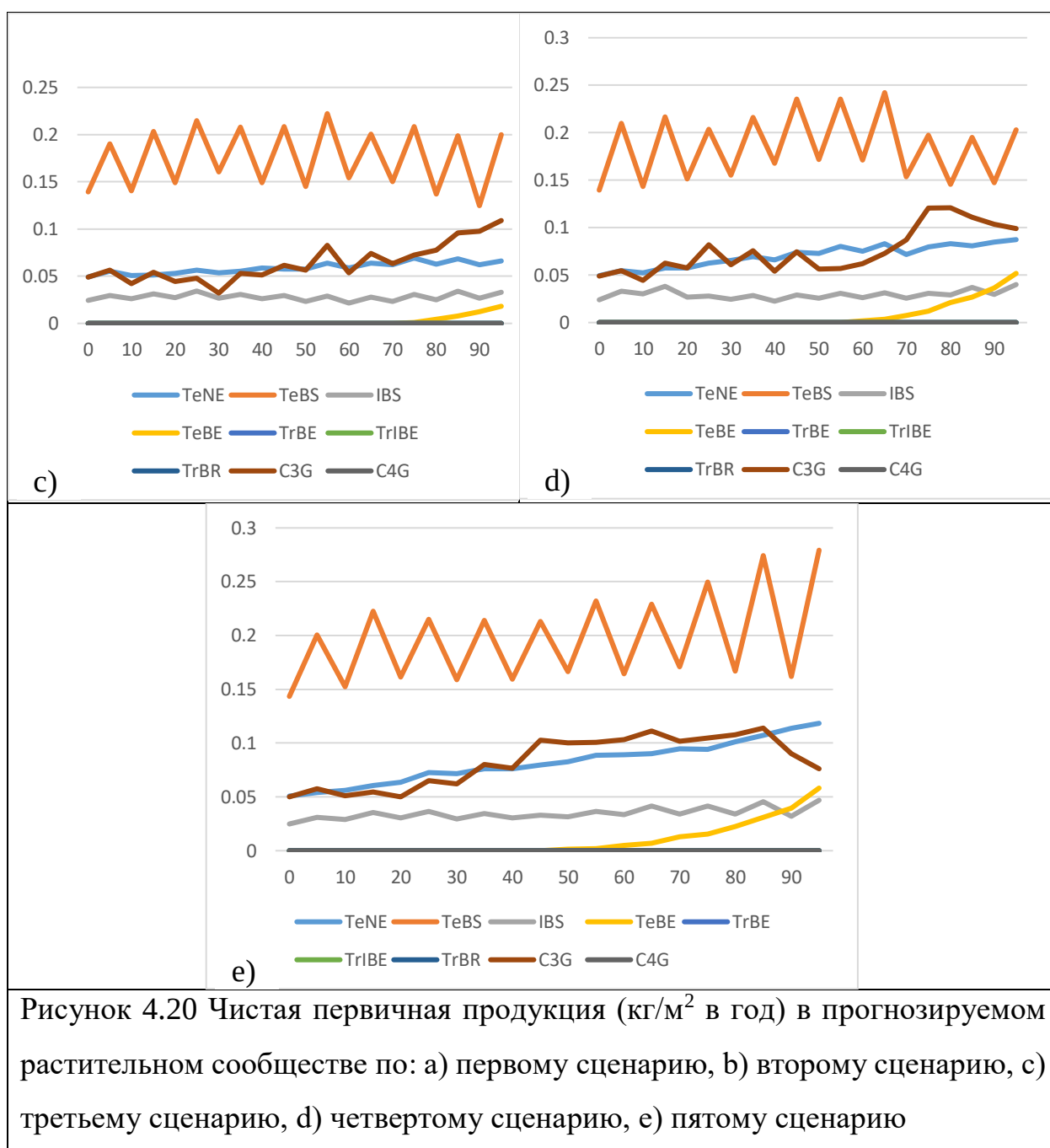


Рисунок 4.19 Перемещение N (кг/га в год) в прогнозируемом растительном сообществе по: а) первому сценарию, б) второму сценарию, с) третьему сценарию, д) четвертому сценарию, е) пятому сценарию,

Динамика значений происходит только в значениях дыхания почвы и чистого потока азота во всех сценариях, имеет крайне неравномерный характер без явного тренда и зависимости от уровня потепления. Только в пятом сценарии наблюдается некоторое общее снижение поглощения N.





Во всех прогнозируемых сценариях отмечается высокая продуктивность травянистой группы, наравне с древесной растительностью. И в первом сценарии ее показатель к концу периода начинает преобладать. Во втором сценарии увеличение продуктивности травянистой группы становится более заметным. В третьем сценарии отмечается рост продуктивности уже трех групп растительности: TeNE, TeBE и C3G. А степень их роста увеличивается по мере увеличения показателя температуры в пятом сценарии, в котором за 100 лет продуктивность травянистой растительности и можжевельника

увеличилась вдвое, а появившийся в ландшафте земляничник достигнет показателя до 0,06 кг/м² в год.

Анализируя результаты по двум выбранным ключевым участкам, можно проследить влияние орографических особенностей местности на локальном уровне, за счет которых на очень близко расположенных участках формируются различные климатические особенности, в можжевельовом лесу изначально средние температуры выше, чем в пушистодубовом. Данные различия, при общем характере изменений, определяют сроки, через которые в том или ином сценарии начнутся процессы изменения, что особенно заметно по появлению в ландшафте группы деревьев ТеВЕ. Помимо теплового режима орография в целом создает сильно отличающиеся условия для произрастания растений. Ровный пологий склон первого ключевого участка подходит для формирования пушистодубового сообщества с сопутствующей растительностью, в то время как крутые осыпные склоны больше подходят для растений, переносящих засуху и способных закрепляться в скалах без мощного почвенного покрова.

4.9. Промежуточные выводы по разделу

В результате проведенного исследования были получены результаты, демонстрирующие пространственно-временную динамику лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма. На основе характеристик кронового рельефа, количества солнечной радиации и значений индекса NDVI рассчитана энтропия, которая отражает сложность организации исследуемых ключевых участков и ее изменение во времени. Что демонстрирует процессы развития и стабилизации лесных ландшафтов. Основную роль в данных процессах играют сезонные изменения, в течение года происходит изменение поступления солнечной радиации и уровня развития кроны у деревьев, что приводит к перераспределению изучаемых параметров в ландшафте.

В межгодовой динамике индекс NDVI имеет устойчивую тенденцию к росту значений. На большей части территории Юго-Восточного Крыма

наблюдается либо рост значений, либо их незначительные изменения. Для пушистодубовых и можжевельниковых лесов характерны наибольшие значения прироста, что указывает на формирование благоприятных условий для развития данных лесных сообществ. Отрицательные значения встречаются внутри и на границах населенных пунктов, что объясняется исключительно антропогенной деятельностью. Коэффициент вариации также указывает на нестабильные значения индекса NDVI на территории населенных пунктов и сельскохозяйственных территорий.

Анализ индекса Херста, в свою очередь, выявил высокие значения вблизи населенных пунктов, что позволяет спрогнозировать долгосрочное сохранение тенденции изменения растительности на этих территориях.

При анализе результатов динамической модели растительности отмечается влияние локальных особенностей на формирование микроклимата, которое проявляется в разном температурном режиме территориально близко расположенных друг к другу лесных ландшафтов. Что, в итоге, влияет на скорость протекания процессов изменения под влиянием глобальных климатических изменений. При сохранении прогнозируемых тенденций изменения климата на основе расчетов динамической модели выявлены предпосылки к расширению зоны субсредиземноморского типа климата с развитием соответствующей растительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

1. В результате обзора отечественных и зарубежных исследований в области формирования и функционирования лесных горных ландшафтов на топологическом уровне установлено, что исследуемым вопросам как в мировой, так и в отечественной литературе уделяется крайне мало внимания. Наблюдается разрозненность методик исследования, разорванность и несвязность ареалов исследований, различные подходы к трактовкам изучаемых явлений. Исследования часто приводятся для региональных операционно-территориальных единиц, по пути укрупнения и усреднения, при этом теряется связь с локальным уровнем исследования, и попытками установить основные закономерности формирования и функционирования горных ландшафтов на топологическом уровне.

2. Благодаря разработанному научному подходу использования БПЛА для изучения функционирования низкогорных ландшафтов установлено, что поступление солнечной радиации на поверхность крон в ясную безветренную погоду определяется крутизной кронового рельефа и ориентацией склона по отношению к солнцу в конкретный период времени. Максимальные значения характерны для пологих склонов в 12:00. Пространственно-временная дифференциация значений суммарной солнечной радиации, проникающей в подпологовое пространство в пределах светового дня, определяется сомкнутостью и положением крон относительно направленных на поверхность солнечных лучей. Так же на неоднородность в пропускании суммарной солнечной радиации пологом большое влияние оказывают плотность листового перекрытия и «окна», образующиеся между ветвями деревьев. Отмечается большая амплитуда значений степени пропускания от 8 до 100 % в пределах пушистодубовых и можжевельниковых лесов.

3. При рассмотрении составляющих радиационного баланса отмечается, что средние значения элементов коротковолновой части показывают характер изменения с максимальными значениями радиации в полдень. Разница между минимальными и максимальными значениями доказывает сложность кронового рельефа изучаемых типов лесов и распределения в них потоков поступающей радиации. Длинноволновое излучение, с ростом значений, указывает на постепенный прогрев почвенного покрова на протяжении всего дня и отдачу тепла в приземный слой воздуха, что при сравнении с коротковолновой частью формирует отрицательный радиационный баланс в затененных участках подпологового пространства и положительный баланс на открытых. Данное распределение значений демонстрирует сложную организацию и протекание процессов распределения потоков вещества и энергии в пушистодубовом и можжевелевом лесах.

4. Полученные данные об элементах теплового баланса демонстрируют, что наибольшая часть радиационного баланса расходуется на турбулентный поток тепла, и меньшая часть расходуется на испарение и поток тепла в почве. Также большую роль в распределении поступающей солнечной радиации играют кроны деревьев. Наиболее ярко это наблюдается у лиственных пород деревьев, для которых характерно полное отсутствие листвы в зимний период и максимальное развитие кроны в летний, таким образом под влиянием характера растительности формируется временная (сезонная) дифференциация значений суммарной солнечной радиации, проникающей в подпологовое пространство. Наиболее сильно данное явление фиксируется в пушистодубовом лесу, а в можжевелевом проявляется за счет единичных лиственных деревьев.

5. При анализе показателей характерных для открытой местности и подпологового пространства выявлено, что среднесуточная температура воздуха в лесу за рассматриваемый период всегда выше температуры на открытом участке благодаря наличию кроны, влияние которой увеличивается по мере ее развития. Для значений температуры почвы характерно сохранение

тепла пологом леса в зимний период, в марте значения выравниваются и с началом вегетационного периода отмечается снижение температуры в лесном участке. Характер изменения значений турбулентного потока тепла и затрат тепла на испарение соответствует радиационному балансу, происходит постепенное увеличение значений с зимнего по летний период. Поток тепла в почву в свою очередь характеризуется попеременным возрастанием и уменьшением в рамках определенного диапазона, с уменьшением амплитуды в летний период.

6. Установлено, что лесная растительность всегда оказывает влияние на тепловой баланс ландшафтов, но степень ее влияния определяется сезонной сменой листвы деревьями, чем более развитая крона, тем сильнее ее влияние на распределение потоков тепла и энергии.

7. Проанализированные особенности элементов водного баланса формируют условия, способствующие вытеснению степных сообществ лесными видами, что подтверждается результатами полевых и дистанционных исследований.

8. Показатель энтропии демонстрирует сезонные изменения сложности распределения солнечной радиации, индекса NDVI, экспозиции и крутизны кронового рельефа, изменения которых влечет за собой изменение некоторых климатических параметров, таких как температура воздуха, почвы, количества испарения. Это, в свою очередь, приводит к трансформации всей системы взаимодействий внутри ландшафта. На основании анализа видно, что в формировании факторной энтропии ландшафта большую роль играет сезонная динамика его собственных и окружающих компонентов, что отражается в формировании стратегий развития или стабилизации основных типов ландшафтов. Таким образом полученные значения указывают на то, что при смене сезонов за счет высоты солнца над горизонтом в летний период происходят процессы стабилизации.

9. На основе расчета индекса NDVI и анализа его пространственно-временной изменчивости с 2001 по 2022 гг. установлено, что в пределах Юго-

Восточного Крыма наиболее стабильными по значениям зеленой фитомассы являются ландшафты лесов, по сравнению с ландшафтами степей и антропогенно созданных сельскохозяйственных угодий и населенных пунктов. В пределах Юго-Восточного Крыма с 2001 по 2022 гг. наблюдается тенденция к росту значений вегетационного индекса и имеется положительный тренд на увеличение значений вегетационного индекса NDVI. Наибольшие значения положительных трендов изменчивости выявлены в ландшафтах, где преобладают мозаичные комплексы можжевельниковых и дубовых лесов. Эти результаты указывают на формирование стратегий развития в общем контексте данных ландшафтов.

10. По результатам анализа значений индекса Херста, рассчитанного на основании вегетационного индекса NDVI, выявлено, что тренд изменения зеленой фитомассы сохранит свою направленность на увеличение, и в целом система будет оставаться стабильной, и будут сформированы предпосылки для стратегии развития в пределах рассматриваемых можжевельниковых и дубовых лесных ландшафтов. Наивысшие значения преобладают в прибрежных, южных и юго-восточных частях Юго-Восточного Крыма, особенно вблизи населенных пунктов, таких как Щebetовка, Курортное, Судак, Солнечная Долина и другие.

11. На основе сценариев изменения климата были спрогнозированы основные показатели состояния и функционирования пушистодубового и можжевельникового лесов на протяжении ближайших 100 лет. Получены общие данные по продуктивности и объему занимаемой биомассы каждой группы деревьев и травянистой растительности. Выявлены предпосылки к смещению границ субтропической зоны (средиземноморского типа климата) на север с развитием соответствующей растительности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Агроклиматический справочник по Крымской области / Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР ; Упр. гидрометеорол. службы УССР ; Крымское гидрометеобюро. Ленинград : Гидрометеиздат, 1959. 136 с.
2. Агрокліматичний довідник по Автономній Республіці Крим (1986–2005 р.) / ред.: О. І. Прудко, Т. І. Адаменко. Симферополь : Таврида, 2011. 342 с.
3. Акатов П.В. Изменение верхней границы распространения древесных видов растений на Западном Кавказе (бассейн р. Белой) в связи с современным потеплением климата // Экология. 2009. № 1. С. 37-43.
4. Акимова Д. П. Радиационный и тепловой режимы в дубово-сосновых культурах на высоте 1300 м и в области питания минеральных источников // Научные труды Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства. 1972. Вып. 11. С. 3–11.
5. Алексеев В. А. Световой режим леса / АН СССР, Ботан. ин-т им. В. Л. Комарова. Ленинград : Наука, Ленингр. отд-ние, 1975. 227 с.
6. Амеличев Г. Н., Токарев С. В., Токарев И. В. Формирование и режим карстовых подземных вод в бассейне р. Абдалка (Предгорный Крым) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5, № 2. С. 202–233.
7. Антюфеев В. В. Радиационный баланс и устойчивость горно-лесных экосистем в рекреационных районах Крыма // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. 1988. Т. 104. С. 140–152. EDN ORYVRF.
8. Арманд Д. Л. Наука о ландшафте : (Основы теории и логико-математические методы). Москва : Мысль, 1975. 288 с.

9. Атлас. Автономна Республіка Крим : карта, картографічне видання = Атлас : Автономная Республика Крым / под ред.: М. В. Багров, Л. Г. Руденко. Сімферополь : Таврійський національний університет ім. В. І. Вернадського, 2003. 79 с.
10. Барашкова Е. П. Радиационный баланс Карадага // Актинометрия и атмосферная оптика : труды совещания / ред. К. С. Шифрин. Ленинград : Гидрометеиздат, 1961. С. 42–47.
11. Барышникова О. Н. Информационные свойства ландшафтных геосистем и возможности их исследования // География и природопользование Сибири. 2009. Вып. 11. С. 30–35.
12. Барышникова О. Н., Крупочкин Е. П., Барышников Г. Я. Изучение разнообразия геосистем на основе статистической обработки космических снимков // География и природопользование Сибири. 2009. Вып. 11. С. 35–42.
13. Бебия С. М. Ольховые леса Абхазии // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2021. № 3 (160). С. 17–25. <https://doi.org/10.36305/2712-7788-2021-3-160-17-25>.
14. Берлянд М. Е. Предсказание и регулирование теплового режима приземного слоя атмосферы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1956. 235 с.
15. Берлянд Т. Г. Радиационный и тепловой баланс Европейской территории СССР. Ленинград : изд-во и 2-я типолитогр. Гидрометеиздата, 1948. 68 с. (Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова ; Вып. 10 (72)).
16. Беручашвили Н. Л. Геофизика ландшафта : [учебное пособие для ун-тов по спец. "География"]. Москва : Высшая школа, 1990. 286 с.
17. Беручашвили Н. Л. Четыре измерения ландшафта. Москва : Мысль, 1986. 180 с.
18. Биоразнообразие биомов России. Равнинные биомы / Под ред. Г. Н. Огуревой. М.: ФГБУ «ИГКЭ», 2020. 623 с.
19. Битюков Н. А. Радиационный режим материнских буковых древостоев сочинского национального парка // Географические исследования

Краснодарского края : сборник научных трудов. Краснодар : Кубан. гос. ун-т, 2012а. Вып. 7. С. 56–68.

20. Битюков Н. А. Теплообмен и тепловой баланс бурых лесных почв под букняками // Известия Сочинского государственного университета. 2012b. № 3 (21). С. 224–230.

21. Бобра Т. В. Ландшафтные границы: выявление, анализ, картографирование. Симферополь : ТНУ, 2005. 168 с.

22. Бобра Т. В. Сборник научных статей и эссе на тему организации геопространства, геоэкотонов и экотонизации (2004–2006 г.). Симферополь : ТНУ, 2007. 160 с.

23. Бобра Т. В., Багрова Л. А. Крымское южнобережное субсредиземноморье (восточная часть) // Перспективы создания единой природоохранной сети Крыма. Симферополь : Крымучпедгиз, 2002. С. 158–169.

24. Бобра Т. В., Лычак А. И. Мониторинг экологического состояния лесов восточного южнобережья Крыма // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия : География. 2004. Т. 17 (56), № 3. С. 46–56.

25. Боков В. А., Горбунов Р. В. Климатическая диссимметрия склоновых локальных ландшафтных комплексов Горного Крыма // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия : География. 2011. Т. 24 (63), № 1. С. 3–14.

26. Боков В. А., Яковлева О. Б. Причинно-следственные отношения в процессах формирования увлажнения ландшафтных комплексов // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Т. 6 (16), вып. 1. С. 39–56.

27. Борисов А. А. Радиационный режим Крыма // Материалы по метеорологии и климатологии. 1963. Вып. 1. С. 24–40.

28. Бочарников М. В., Петрушина М. Н., Сулова Е. Г. Пространственная организация растительности и ландшафтов пояса

субсредиземноморских лесов и редколесий полуострова Абрау (Северо-Западный Кавказ) // Аридные экосистемы. 2019. Т. 25, № 4 (81). С. 30–41.

29. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Ленинград : Гидрометеиздат, 1956. 256 с.

30. Бужинский Е. П. Приоритеты развития беспилотников: от военного дела к экономике // Индекс безопасности. 2014. Т. 20, № 2 (109). С. 109–118.

31. Ведь И. П. Радиационный баланс и фитоклимат молодых насаждений сосны крымской // Лесоведение. 1974. № 5. С. 3–9.

32. Ведь И. П. Роль наземных гидрометеоров в водном балансе Крымского нагорья // Метеорология и гидрология. 1967. № 4. С. 68–72.

33. Ведь И. П. Сезонные особенности радиационного, теплового и водного режимов мелиоративных насаждений сосны крымской // Известия АН СССР. Серия географическая. 1978. № 2. С. 79–84.

34. Ведь И. П. Тепловой и радиационный баланс леса на Крымском нагорье // Известия АН СССР. Серия географическая. 1971. № 2. С. 61–70.

35. Ведь И. П., Федосеев А. П. О влиянии молодой культуры сосны на радиационный и тепловой режим приземного слоя воздуха в районе Крымских нагорий // Лесоводство и агролесомелиорация. 1967. Вып. 13. С. 71–78.

36. Вечерков В. В., Дунаева Е. А., Филина Я. А. Совместное использование ДЗЗ и БВС для оценки внутриполевой неоднородности // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : Материалы X Международной научной конференции, Красноярск, 12–15 сентября 2023 года / Научный редактор Е.А. Ваганов, отв. редактор Г.М. Цибульский. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. С. 22–26. EDN SMSHYT.

37. Воейков А. И. Климаты земного шара, в особенности России. Санкт-Петербург : Картогр. заведение А. Ильина, 1884. 640 с.

38. Воздушный кодекс Российской Федерации : [19 марта 1997 года № 60-ФЗ : принят Государственной Думой 19 февраля 1997 года : одобрен

Советом Федерации 5 марта 1997 года : (в ред. Федеральных законов от 8.07.1999 № 150-ФЗ . от 02.07.2021 № 331-ФЗ, с изм., внесенными Постановлением Конституционного Суда РФ от 16.07.2018 № 32-П)] : текст с изменениями и дополнениями на 2022 год. [Офиц. изд.]. Москва : Эксмо, 2022. 93 с.

39. Выгодская Н. Н. Методика фитоактинометрических исследований в горных районах // Фитоактинометрические исследования горных лесов. Владивосток : Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 20–37.

40. Выгодская Н. Н. Радиационный режим 30-летнего дубняка в суточной и сезонной динамике // Световой режим, фотосинтез и продуктивность леса : [материалы совещания. 9–11 февр. 1965 г.] / [отв. ред. Ю. Л. Цельникер]. Москва : Наука, 1967. С. 77–94.

41. Гаркуша Л. Я. Внутриладшафтная структура и экологические особенности грабовых лесов горного Крыма // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия: География. 2008. Т. 21 (60), № 3. С. 102–118.

42. Гаркуша Л. Я. Карта растительности Горного Крыма // Трансформация ландшафтно-экологических процессов в Крыму в XX веке – начале XXI века / под ред. В. А. Бокова. Симферополь : Доля, 2010. С. 262–265.

43. Гаркуша Л. Я., Багрова Л. А. Состав, структура и современное экологическое состояние "дубков" лесостепного пояса предгорного Крыма // Экосистемы. 2012. № 6 (25). С. 62–75.

44. Геворкян Ф. С. О комплексных геоморфологических показателях для характеристики эрозионного расчленения // Геоморфология. 1972. № 3. С. 44–48.

45. Геологическая карта Горного Крыма. Масштаб 1:200000 / гл. ред. Н. Е. Деренюк ; МинГео СССР. [Симферополь] : [б. и.], 1984. 1 лист.

46. Герасимов Я. И., Древинг В. П., Ерёмин Е. Н., Киселёв А. В., Лебедев В. П., Панченков Г. М., Шлыгин А. И. Курс физической химии / под общ. ред. Я. И. Герасимова. Москва : Химия, 1969. Т. 1. 592 с.
47. Геренчук К. І., Раковська Е. М., Топчієв О. Г. Польові географічні дослідження. Київ : Вища школа, 1975. 246 с.
48. Глухов И. Г. О водном балансе и гидрогеологическом районировании Юго-Западной части Главной гряды Крымских гор // Вестник Московского государственного университета. 1959. Вып. 4. С. 147–160.
49. Гойса Н. И. Радиационный баланс и эффективное излучение на территории Украины и Молдавии // Труды УкрНИГМИ. 1964. Вып. 41. С. 3–22.
50. Гойса Н. И. Распределение суммарной радиации по территории Украины и Молдавии // Труды УкрНИГМИ. 1961. Вып. 26. С. 14–28.
51. Голубев В. Н. К изучению эколого-биологической структуры растительных сообществ (на примере дубово-можжевеловых лесов Южного берега Крыма) // Ботанический журнал. 1989. Т. 74, № 8. С. 1140–1153.
52. Голубева И. В. К эколого-биологической характеристике высокоможжевеловой и пушистодубовой формаций заповедника «Мыс Мартыан» // Бюллетень Никитского ботанического сада. 1981. Вып. 3 (46). С. 22–27.
53. Горбунов Р. В. Внутриландшафтные факторы формирования диссимметрии склоновых локальных ландшафтных комплексов Горного Крыма // Людина та довкілля. Проблеми неоекології. 2011а. № 3–4. С. 67–72.
54. Горбунов Р. В. Собственная диссимметрия склоновых локальных ландшафтных комплексов // Экосистемы, их оптимизация и охрана. 2011b. № 4 (23). С. 157–173.
55. Горбунов Р. В. Функционирование и динамика региональных геоэкосистем в условиях изменения климата (на примере Крымского полуострова). Москва : Товарищество научных изданий КМК, 2022. 191 с.

56. Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю. Проявление снеговой диссимметрии склоновых локальных ландшафтных комплексов в Юго-Восточном Крыму // Биоразнообразие и устойчивое развитие : материалы докладов III Международной научно-практической конференции, Симферополь, 15–19 сентября 2014 года / гл. ред. Н. В. Багров. Симферополь : Крымский научный центр, 2014. С. 91–93.

57. Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю., Кузнецов А. Н., Кузнецова С. П., Лебедев Я. О., Ву М. Особенности формирования элементов радиационного баланса среднегорных тропических лесов южного Вьетнама // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского природного заповедника РАН. 2019. Вып. 4 (12). С. 3–16.

58. Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю., Табунщик В. А., Дрыгваль А. В. Радиационный баланс экосистем дубовых лесов Крымского полуострова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2020а. Т. 28, №. 3. С. 201–212. .

59. Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю., Табунщик В. А., Дрыгваль А. В. Структура и межгодовая динамика радиационного баланса региональных экосистем равнинного Крыма // Экосистемы. 2020b. № 23 (53). С. 5–15. <https://doi.org/10.37279/2414-4738-2020-23-5-15> .

60. Горбунов Р. В., Зуев А. В., Смирнов В. О. Воднобалансовые исследования на территории Карадагского ландшафтно-экологического стационара // 100 лет Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского : сборник научных трудов / ГБУ НОП РК «Карадагский природный заповедник», ФГБУН «Институт морских биологических исследований РАН». Симферополь : Н.Оріанда, 2015. С. 734–747.

61. Горбунов Р. В., Зуев А. В., Снегур А. В. Задержание осадков растительным покровом на территории Карадагского ландшафтно-экологического стационара // Заповедники Крыма. Теория, практика и перспективы заповедного дела в Черноморском регионе : материалы V

Международной научно-практической конференции, Симферополь, 22–23 октября 2009 года. Симферополь _2009. С. 37–41.

62. Горбунов Р. В., Табунщик В. А., Горбунова Т. Ю., Сафонова М. С. Первичные сведения о водном балансе субтропических пушистодубовых ландшафтов Юго-Восточного Крыма // Изучение водных и наземных экосистем: история и современность : Тезисы докладов II Международной научно-практической конференции, Севастополь, 05–09 сентября 2022 года. Севастополь : Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», 2022. С. 85–86. EDN YCSXJPS.

63. Гусев Е. М. Прогнозирование изменения составляющих водного баланса Степного Крыма и влагообеспеченности его фитоценозов в XXI в / Е. М. Гусев, О. Н. Насонова // III Международная научная конференция по междисциплинарным исследованиям : сборник статей, Екатеринбург, 15 сентября 2023 года / ООО «Институт цифровой экономики и права». Екатеринбург : Общество с ограниченной ответственностью "Институт Цифровой Экономики и Права", 2023. С. 239–245.

64. Демина О. Н., Рогаль Л. Л., Дмитриев П. А. Сосна пицундская (*pinus pityusa stev.*) В заповеднике "Утриш": ценоотическое разнообразие и анализ популяционной структуры // Охрана биоты в государственном природном заповеднике "Утриш" : научные труды / Государственный природный заповедник «Утриш». Майкоп : ООО «Полиграф-ЮГ», 2015. С. 142–156.

65. Дидух Я. П. Растительность // Атлас. Автономна Республіка Крим : карта, картографічне видання = Атлас : Автономная Республика Крым / [ред. М. В. Багров, Л. Г. Руденко]. Симферополь : Таврійський національний університет ім. В. І. Вернадського, 2003. С. 30.

66. Дидух Я. П. Растительный покров Горного Крыма (структура, динамика, эволюция и охрана). Киев : Наукова думка, 1992. 256 с.

67. Драган Н.А. Почвы Крыма // Атлас. Автономна Республіка Крим : карта, картографічне видання = Атлас : Автономная Республика Крым / [ред. М. В. Багров, Л. Г. Руденко]. Симферополь : Таврійський національний університет ім. В. І. Вернадського, 2003. С. 30.
68. Дубинина М. Г. Технично-економічний аналіз військових БПЛА Ізраїля // Концепції. 2017. № 1 (36). С. 21–29.
69. Дублянський В. Н. О роли испарения и водном балансе Горного Крыма // Труды УкрНИГМИ. 1966. Вып. 62. С. 49–55.
70. Дунаева Е. А., Попович В. Ф., Ляшевский В. И. Анализ динамики количественных и качественных характеристик водных ресурсов с использованием открытых ГИС и агрогидрологических моделей // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2015. № 1 (17). С. 127–141.
71. Ена А. В. Природная флора Крымского полуострова. Симферополь : Н.Оріанда, 2012. 232 с.
72. Ена В. Г., Ена Ал. В., Ена Ан. В. Заповедные ландшафты Тавриды. Симферополь : Бизнес-Информ, 2004. 424 с.
73. Ергина Е. И., Горбунов Р. В., Тронза Г. Е., Лебедев Я. О., Хижняк Ю. С. Изучение и идентификация почвенных эталонов и редких почв с целью мониторинга и охраны почвенных ресурсов в Равнинном Крыму. Симферополь : Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2017. 136 с.
74. Ермаков Н. Б., Плугатарь Ю. В., Лейба В. Д., Ермакова Е. В. Растительные сообщества широколиственных лесов Колхидской низменности (Западное Закавказье) // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2021. № 138. С. 39–49. <https://doi.org/10.36305/0513-1634-2021-138-39-49>.
75. Зуев А. В., Летухова В. Ю., Зуева Е. А. Климатические изменения как фактор трансформации растительного покрова на примере Карадагского ландшафтно-экологического стационара // Труды Карадагской научной

станции имени Т. И. Вяземского природного заповедника РАН. 2020. № 1 (13). С. 77–98.

76. Зукерт Н. В., Выгодская Н. Н., Лебедева М. Г., Шерман Е. В. Радиационный режим под пологом горных лесов // Фитоактинометрические исследования горных лесов. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1967. С. 162–178.

77. Иваненко Ф. К. Лесные экосистемы заповедника "Утриш", их исследование и охрана // Наземные и морские экосистемы Причерноморья и их охрана : сборник тезисов научно-практической школы-конференции, Новороссийск, 23–27 апреля 2018 года. Новороссийск: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Институт природно-технических систем", 2018. С. 51–53.

78. Иваненко Ф. К. Мониторинг лесных фитоценозов заповедника «Утриш» в 2011–2016 г. // Наземные и морские экосистемы полуострова Абрау: история, состояние, охрана : научные труды. Анапа : Федеральное государственное бюджетное учреждение "Государственный природный заповедник "Утриш", 2021. Т. 5. С. 79–85.

79. Иванова Н. В., Шашков М. П., Шанин В. Н. Исследование структуры древостоев сосновых лесов Приокско-Террасного биосферного заповедника (Россия) по материалам аэрофотосъемки с квадрокоптера // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2021. Т. 6, № 4. С. 1–14. <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2021.042> .

80. Иванова Н. В., Шашков М. П., Шанин В. Н. Определение характеристик смешанных древостоев по данным аэрофотосъёмки с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2021. № 54. С. 158–175. <https://doi.org/10.17223/19988591/54/8> .

81. Игнатов А.Н., Кошкин Е.И., Андреева И.В., Гусейнов Г.Г., Гусейнов К.Г., Джалилов Ф.С.У. Влияние глобальных изменений климата на

фитопатогены и развитие болезней растений // Агрохимия. 2020. № 12. С. 81–96.

82. Ипполитов И. И., Кабанов М. В., Логинов С. В., Соколов К. И., Харюткина Е. В. Изменчивость составляющих теплового баланса поверхности азиатской территории России в период современного глобального потепления // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 22–29.

83. Исаков А. Л., Лаврова А. Ю. Солнечная радиация и температурный режим земляного полотна // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 3. С. 15–19.

84. Исаченко А. Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 365 с.

85. Исигов В.П., Плугатарь Ю.В., Коба В.П. Методы исследований лесных экосистем Крыма. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2014. 252 с.

86. Кабонен А. В., Ольхин Ю. В. Цифровое моделирование природно-ландшафтных комплексов по данным, полученным с помощью беспилотных летательных аппаратов // Лесохозяйственная информация. 2020. № 3. С. 101–110.

87. Каляев А. И., Коровин Я. С. Комплекс обнаружения и поражения БПЛА-нарушителей с помощью БПЛА-перехватчиков // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 3–4 (153–154). С. 101–107.

88. Карадаг заповедный: научно-популярные очерки / под ред. А. Л. Морозовой. Симферополь: Н.Оріанда, 2011. 288 с.

89. Каюкова Е. П. Использование гидрохимических данных для оценки элементов водного баланса (на примере бассейна Р. Бодрак, юго-западный Крым) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2016. № 4. С. 25–36.
<https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2016.403>.

90. Климат и опасные гидрометеорологические явления Крыма / под ред. К. Т. Логвинова, М. Б. Барабаш. Ленинград : Гидрометеиздат, 1982. 318 с.
91. Климатический атлас Крыма. Симферополь : «Таврия-Плюс», 2000. 118 с.f
92. Клюкин А. А., Корженевский В. В., Щепинский А. А. Эчки-Даг : Путеводитель. Симферополь : Таврия, 1990. 128 с.
93. Клюкин, А. А. Экзогеодинамика Крыма. Симферополь : Таврия, 2007. 320 с.
94. Ключкина А. А., Прокопов Г. А. Современная ландшафтная структура ландшафтно-рекреационного парка "Лисья бухта Эчкидаг" (Юго-Восточный Крым) // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского природного заповедника РАН. 2019. № 1 (9). С. 74–85. <https://doi.org/10.21072/eco.2021.09.03> .
95. Коба В. П. Оценка динамики водного баланса хвойных лесов Горного Крыма // Заповедники Крыма на рубеже тысячелетий : материалы Республиканской конференции, Симферополь, 27 апреля 2001 года. Симферополь : Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского, 2001. С. 52–54.
96. Коба В. П. Экономическая оценка последствий пожаров в лесах Южного берега Крыма // Научные труды Крымского государственного аграрного университета. 2000. № 63. С. 201–205.
97. Кобечинская В. Г., Онищенко Т. С. Послепожарные сукцессии сосновых лесов Крыма // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2017. Т. 3 (69), № 4. С. 112–126. EDN YLMDZB.
98. Конвенция о биологическом разнообразии [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/biodiv.shtml (accessed on 8 August 2023).

99. Кондратьев К. Я., Розенберг Г. В. Совещание по актинометрии и атмосферной оптике // Успехи физических наук. 1959. Т. 68, Вып. 2. С. 345–358. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0068.195906f.0345> .
100. Корженевский В. В. Клейкоольховые леса Южного берега Крыма // Флористические критерии при классификации растительности : тезисы докладов VI Всесоюзного совещания по классификации растительности Уфа, сентябрь 1981 г. Уфа : Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, 1981. С. 142–143.
101. Корженевский В. В. Скальnodубовые леса южного макросклона Главной гряды Крымских гор // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. 1982. Т. 86. С. 36–45.
102. Корженевский В. В., Багрикова Н. А. Растительные сообщества // Биоразнообразие Крыма: оценка и потребности сохранения : материалы, Гурзуф, 10–15 ноября 1997 года / Программа Поддержки Биоразнообразия (The Biodiversity Support Program BSP). Гурзуф : Biodiversity Support Program, 1997. С. 26–31.
103. Корженевский В. В., Клюкин А. А. Растительность бедлендов Крыма // Экология. 1989. № 6. С. 26–33.
104. Корженевский В. В., Плугатарь Ю. В. Леса из *Pinus sylvestris* var. *hamata* Steven на градиентах факторов среды в Горном Крыму // Международный научный институт «Educatio». 2016. № 5 (23). С. 7–11.
105. Корженевский В. В., Шеляг-Сосонко Ю. Р. Синтаксономія пухнастодубових лісів південного макросхилу Кримських гір (Синтаксономія пушистодубових лесов южного макросклона Крымских гор) // Украинский ботанический журнал. 1983. Т. 40, № 1. С. 10–16.
106. Корсакова С. П. Агроклиматические ресурсы участка № 32 Никитского ботанического сада // Научные записки природного заповедника «Мыс Мартьян». 2015. № 6. С. 6–19.

107. Косолапов В. В. Крымско-Кавказская провинция ксерофитных лесов как уникальная область полусухих субтропиков // Курорты. Сервис. Туризм. 2016. № 2 (31). С. 47–50.
108. Котлов И. П., Горбунов Р. В., Фам Май Фыонг, Дин Ву Ан Ту. Беспилотная аэрофотосъемка для задач крупномасштабного картографирования горных тропических лесных ландшафтов // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского природного заповедника РАН. 2018. № 2 (6). С. 63–84. <https://doi.org/10.21072/eco.2021.06.04>.
109. Кочкин М. А. Почвы, леса и климат горного Крыма и пути их рационального использования. Москва : Колос, 1967. 368 с.
110. Кочуров Б. И., Карандеев А. Ю., Мерекалова К. А., Харитонов Т. И., Беляева Л. Н., Климов Д. С. Выделение древесной растительности с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для оценки зеленой инфраструктуры городских ландшафтов // Проблемы региональной экологии. 2021. № 5. С. 42–47.
111. Крупочкин Е. П., Папин Д. В., Фролов Я. В., Редников А. А., Шульга П. И. О результатах мультиспектральной БПЛА-съемки археологических объектов могильника урочище Балчикова-3 с использованием камеры Parrot Sequoia // Теория и практика археологических исследований. 2019. № 4(28). С. 109–121.
112. Кузнецов И. В., Боков В. А., Устюгов Д. Л., Павлюк Н. Я. Методология оценки водно-ресурсного потенциала Крыма и приоритетные задачи его изучения // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2021. Т. 7, № 4. С. 155–171. EDN SFWHMG.
113. Кузнецов М. Е. Возрастная структура ценопопуляций *Tilia dasystyla* в лесах Юго-Восточного Крыма // Устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий : сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции, Сочи, 02–04 декабря 2015 года. Сочи : Государственное бюджетное учреждение Краснодарского края "Природный орнитологический парк в Имеретинской низменности", 2015. С. 135–140.

114. Ландшафтно-геофизические условия произрастания лесов юго-восточной части горного Крыма / под ред. В. А. Бокова. Симферополь : Таврия-Плюс, 2001. 133 с.
115. Ландшафтно-экологический стационар Карадагского природного заповедника / под ред. А. Л. Морозовой, Ю. И. Будашкина, В. А. Бокова. Симферополь : Таврия-Плюс, 1999. 110 с.
116. Леса СССР: Т.3: Леса юга Европейской части СССР и Закавказья. Москва: Наука, 1966. 463 с.
117. Летухова В. Ю. Потапенко И. Л., Кузнецов М. Е. Популяция фисташки туполистной (*Pistacia mutica* Fisot. C.A. Mey.) в долине Беш-Таш (Юго-Восточный Крым) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2016. Т. 1, № 2. С. 11–18.
118. Мазулин Г. А. Использование беспилотных летательных аппаратов Министерства обороны вооружённых сил РФ в Сирии // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. 2017. № 2 (11). С. 45–50.
119. Макарычев С. В., Мазиров М. А. Теплофизические основы мелиорации почв. Москва: [б. и.], 2004. 289 с.
120. Мамай И. И. Динамика ландшафтов. Методика изучения. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. 167 с.
121. Манышев К.С., Слободин Я.А., Филиппов П.Б., Лялина Е.В. Оценка экологического состояния буковых лесов Белогорского района Республики Крым // Малые вавиловские чтения : Сборник материалов Международной научно-практической конференции молодых ученых по итогам научно-исследовательской экспедиции "Дорогами Н.И. Вавилова" в Крым, Саратов, 26–28 ноября 2018 года. Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2018. С. 177–181.
122. Миллер Г. П. Ландшафтные исследования горных и предгорных территорий. Львов: Вища школа, 1974. 202 с.

123. Миронова Л. П. Опасность снижения биоразнообразия при интенсивном освоении природных ресурсов на примере Юго-Восточного Крыма // Природа и общество: Социоприродное взаимодействие во всемирно-историческом процессе, Судак, 14–18 сентября 2020 года. Москва: ООО «МАКС Пресс», 2020. С. 82–91. DOI 10.29003/ml949.s-n_history_2020_43/82-91. EDN PDCCJF.

124. Миронова Л. П. Оценка фиторазнообразия природных комплексов Юго-Восточного Крыма // Биоразнообразие: подходы к изучению и сохранению : материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию кафедры ботаники Тверского государственного университета, Тверь, 08–11 ноября 2017 года. Тверь: Тверской государственный университет, 2017. С. 246–249. EDN YLMLUP.

125. Миронова Л. П. Редкие сосудистые растения во флорах природных комплексов Юго-Восточного Крыма: состояние, степень изученности, проблемы охраны // Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского Природного заповедника РАН. 2019. № 1(9). С. 3–60. DOI 10.21072/eco.2021.09.01. EDN FVXCMD.

126. Миронова Л. П. Фатерыга В. В. Флора Карадагского природного заповедника (сосудистые растения) // 100 лет Карадагской научной станции им. Т.И.Вяземского : сборник научных трудов / ГБУ НОП РК «Карадагский природный заповедник», ФГБУН «Институт морских биологических исследований РАН». Симферополь : Нова Орiанда, 2015. С. 160–204. EDN XEVCXB.

127. Миронова Л. П., Знаменская Л. В. Влияние дикого кабана (*Sus scrofa*) на почвенно-растительный покров в Государственном природном заповеднике «Карадагский» / Ред. Р. В. Горбунов, Ан. В. Ена. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2023. 214 с.

128. Миронова Л. П., Шатко В.Г. Конспект флоры хребта Узунсырт и Баракольской котловины в восточном Крыму // Бюллетень Главного ботанического сада. 2010. № 196. С. 74–101. EDN TOETET.

129. Миронова Л. П., Шатко В.Г. Полуостров Меганом в Юго-Восточном Крыму (природные условия, флора,растительность) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2013. Т. 9, № 2–2. С. 26–64. EDN VMBFUF.
130. Михайлов В.Н. Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология. М.: Высшая школа. 2007. 463 с.
131. Михайлов В. А. Комплексный морфометрический анализ Тарханкутского полуострова с помощью ГИС // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 2–4(46). С. 5–13.
132. Муратов М.В. Краткий очерк геологического строения Крымского полуострова. М.: Госгеолтехиздат, 1960. 207 с.
133. Научно-прикладные основы создания природного национального парка «Таврида» и большой эколого-этнографической тропы в Крыму : Прил. к науч.-практ. дискус.-аналит. сб. "Вопросы развития Крыма" / Ком. по науке и регион. развитию при Совете Министров Автоном. Респ. Крым, Крым. акад. наук; В. Г. Ена [и др.]. Симферополь : Сонат, 2000. 103 с.
134. Нго Ч. З., Нгуен Д. Х., Данг Х. К., Колесников С.И., Минникова Т.В. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для картографирования ландшафта тропической растительности в заповеднике Нгок Линь, Кон Тум, Вьетнам // АгроЭкоИнфо. 2020. № 4(42). С. 1–7.
135. Некляев С.Э., Серая Л.Г., Ларина Г.Е. Экологические последствия современных изменений климата, негативно влияющие на устойчивость хвойных растений к вредителям и афиллофорным грибам // Биосфера. 2022. Т. 14. № 3. С. 235-244.
136. Николаев В.А. Космическое ландшафтоведение. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 81 с.
137. Огнева Т. А. Роль радиационного баланса в суммарном испарении // Тепловой баланс. Труды Главной Геофизической обсерватории им. В. И. Воейкова. 1967. Вып. 193. С. 130–136.
138. Олиферов А. Н. О селевых паводках в Крыму // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2005. Вып. 2. С. 67–72.

139. Остроухов А. В., Климина Е. М., Купцова В. А. Ландшафтное картографирование труднодоступных территорий на примере государственного природного заповедника «Болоньский» (Россия) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2020. Т. 5, № 2. С. 47–63.
140. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Изд. «Наука» Сибирское отделение, 1979. 284 с.
141. Папельбу В.В. Плотность упаковки видов сообществ чернососнового леса в Горном Крыму на разных стадиях рекреационной дигрессии // Интеграция современных научных исследований в развитие общества : сборник материалов V Международной научно-практической конференции, Кемерово, 07 мая 2018 года. Том 2. Кемерово: Общество с ограниченной ответственностью «Западно-Сибирский научный центр», 2018. С. 45–47.
142. Петлін В.М. Стратегія ландшафту. Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2007. 288 с.
143. Петрушина М. Н. Биогеохимические особенности ландшафтов заповедника «Утриш» // Наземные и морские экосистемы полуострова Абрау: история, состояние, охрана : Научные труды. Анапа : Федеральное государственное бюджетное учреждение "Государственный природный заповедник «Утриш», 2021. С. 48–57.
144. Петрушина М. Н., Пичугина Е. М., Ермолов И. Л. Особенности ландшафтов водопадной щели заповедника «Утриш» // Наземные и морские экосистемы полуострова Абрау: история, состояние, охрана : Научные труды. Анапа: Федеральное государственное бюджетное учреждение "Государственный природный заповедник "Утриш", 2021. С. 38–47.
145. Плугатарь Ю. В., Астапов А. Ю. Мониторинг лесов Крыма // Моніторинг навколишнього середовища: науково-методичне, нормативне, технічне, програмне забезпечення : Матеріали другої науково-практичної конференції, Коктебель, 24–28 сентября 2007 года. Коктебель: НПЦ «Екологія наука техніка», 2007. С. 52–54. EDN ZSNLRF.

146. Плугатарь Ю. В., Коба В. П., Сахно Т. М., Хромов А. Ф. Типологическая структура и продуктивность сосновых лесов Горного Крыма // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2019. № 3(152). С. 26–35.
147. Плугатарь Ю. В., Корженевский В. В. Типология и экология лесов Крыма // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. 2016. Т. 143. С. 164–172. EDN XCDKEN.
148. Плугатарь Ю. В., Корженевский В. В., Абраменков А. А. Шибляк или маквис? О внедрении *Quercus ilex* L. в фитоценозы южнобережного Крыма // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2022. № 3(164). С. 6–19. DOI 10.36305/2712-7788-2022-3-164-6-19. EDN WITGTL.
149. Плугатарь Ю.В. Леса Крыма. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2015. 385 с.
150. Плугатарь Ю.В., Ковалев М. С., Плугатарь С. А. Дубовые леса Горного Крыма: распространение, типологическая структура, продуктивность // Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2013. № 11. С. 88–92. EDN SMKXUB.
151. Плугатарь, Ю. В., Коба В. П. Значение лесных ресурсов в формировании водного баланса Крыма // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : Материалы второй Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2017 года / Под редакцией В.М. Гедьо. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2017. С. 121–122. EDN ZIMBNP.
152. Поверхностные водные объекты Крыма. Управление и использование водных ресурсов: справочник / под ред. А. А. Лисовского. Симферополь: КРП «Издательство «Крымучпедгис», 2011. 242 с.
153. Покоева М. В., Ярославцев А. М. Экологические исследования смешанных насаждений методами дистанционного зондирования // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2020. Т. 24. № 3. С. 33–38.

154. Постарнак Ю. А. Редкий генофонд светлохвойных лесов из сосны пицундской в прибрежной зоне Черного моря России // Экологические проблемы рекреационного использования горных лесов : Материалы I Всероссийской научно-практической конференции, Краснодар, 14 ноября 2020 года. Краснодар: Кубанский государственный университет, 2020. С. 160–165.
155. Почвенная карта УССР. 1966. 10 листов.
156. Природа Карадага / Под ред. А.Л. Морозовой, А.А. Вронского. Киев: Наукова думка, 1989. 286 с.
157. Прохорова У. В., Терехов А. В., Иванов Б. В., Веркулич С. Р. Расчет составляющих теплового баланса ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) в период абляции по данным наблюдений 2019 года // Криосфера Земли. 2021. Т. 25, № 3. С. 50–60.
158. Пшеничников Н.А. Особенности типологической структуры средиземноморских лесных формаций в Горном Крыму // Природные ресурсы : состояние и рациональное использование : материалы Международной научно-практической конференции, Орёл, 15–16 декабря 2021 года. Орёл: Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, 2022. С. 354–365. EDN HXSGDY.
159. Разработка экологически сбалансированных способов защиты и восстановления водных объектов на территории Крыма / под ред. д.геогр.н., проф. Бокова В. А. Симферополь: ТНУ, 2013. 211 с.
160. Рахманов, В.В. Гидроклиматическая роль лесов. Москва: Лесная промышленность, 1984. 240 с.
161. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 6: Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым Ленинград: Гидрометеиздат, 1966. 344 с.
162. Роговой В.И. Особенности воспроизводства буковых лесов Крыма // Биологическое разнообразие и устойчивость лесных и урбоэкосистем. Первые международные чтения памяти Г.Ф. Морозова: Материалы научно-практической конференции, Ялта, 12–15 сентября 2019 года. Ялта: Общество

с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2019. С. 98–100.

163. Рубцов Н.И., Махаев Л.В., Шалыт М.С., Котова И.Н. Растительный мир. Симферополь: Крым, 1966. 118 с.

164. Сангулия Т. Б. буковые леса Абхазии // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2013. № 4. С. 45–50. EDN RIWOGR.

165. Сангулия Т. Б., Сиволапов А. И. Ценный генофонд бука восточного (*fagusorientalislipsky*) в Рицинском реликтовом национальном парке (Республика Абхазия) // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. С. 365. EDN ROFXNR.

166. Санданов Д.В., Батоцыренов Э.А. Фенологический отклик раннецветущих растений Бурятии на изменения климата // Растительный мир Азиатской России: Вестник Центрального сибирского ботанического сада СО РАН. 2020. № 4 (40). С. 68-78.

167. Сивков С.И. Некоторые выводы из актинометрических наблюдений в Феодосии и Карадаге // Метеорология и гидрология. 1940. № 10. С. 3–13.

168. Сеницын Е. М. Смена поколений девственных буковых древостоев Крымского природного заповедника. Воронеж: ВГПУ, 2010. 123 с. ISBN 978-5-88519-613-0. EDN QKTBVN.

169. Скуднева О. В., Коптев С. В., Иванцов С. В. Навигационно-пилотажная система беспилотного летательного аппарата для мониторинга лесных пожаров // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 6(378). С. 194–203.

170. Смирнов В. О. Анализ геофизических параметров заповедника «Мыс Мартьян»: расчеты прямой, рассеянной и суммарной радиации // Научные записки природного заповедника «Мыс Мартьян». 2016. № 7. С. 56–61. EDN XCBZOT.

171. Смирнов В. О. Водный режим почв заповедника «Мыс Мартьян» и его связь с геотопологическими параметрами территории // Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия: География. 2009. Т. 22 (61), № 2. С. 121–138. EDN UNXIFZ.

172. Смирнов В. О. Роль местоположений в дифференциации тепла и влаги в Горном Крыму: автореферат дисс. на соискание уч. степени канд. геогр. наук: спец. 11.00.01 «Физическая география, геофизика и геохимия ландшафтов» / В. О. Смирнов. Симферополь, 2009. 22 с.

173. Смирнов В.О. Влияние условий затенения на перераспределение прямой солнечной радиации (на примере территории заповедника «Мыс Марьян») // Культура народов Причерноморья. 2009. № 164. С. 168–171.

174. Смирнов В.О. Некоторые аспекты фитоактинометрических исследований в лесах заповедника «Мыс Мартьян» // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2012. Т. 8. № 1–2. С. 104–109.

175. Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий / Е. А. Позаченюк, В. М. Шумский, А. М. Лесов [и др.] ; Республиканский комитет Автономной республики Крым по охране окружающей природной среды Таврический национальный университет имени В.И. Вернадского. Симферополь : Бизнес-Информ, 2009. 672 с.

176. Солнцев В.Н. Системная организация ландшафтов. М.: Наука, 1981. 239 с.

177. Соцкова Л. М., Смирнов В.О. Подходы к информационно-картографической интерпретации трансформации водного баланса Крыма // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия: География. 2011. Т. 24 (63), № 2–2. С. 51–58. EDN UNXJDV.

178. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск.: Наука, 1978. 320 с.

179. Способ определения удельной теплоемкости почв. Патент РФ, № 4914260. М., 1993. 4 с.

180. Сурова Н.А. Продуктивность и тепловой баланс бореальных лесов южнокурильских островов // Самарская лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2018. Т.27, № 2. С. 147–160.
181. Сухачева Е. Ю., Ревина Я. С. Цифровая почвенная карта южного берега Крыма // Почвоведение. 2020. №. 4. С. 389–397.
182. Тимченко З.В. Гидрография и гидрология рек Крыма. Симферополь: АРИАЛ, 2012. 290 с.
183. Тищенко А. П. Экспериментальные исследования по изучению водного баланса риса в Крыму // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2017. № 2(66). С. 45–50. EDN YZKJXX.
184. Токарев С. В., Амеличев Г. В., Токарев И. В. Гидрохимические и гидродинамические особенности карстовых подземных вод Юго-Восточной части г. Симферополь в условиях антропогенно-нарушенного режима // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5, № S4. С. 199–218. EDN QBJUQE.
185. Трансформация водного баланса в Крыму в XX веке начале XXI века / под ред. В.А. Бокова. Симферополь: Крымский научный центр, 2011. 227 с.
186. Трансформация ландшафтно-экологических процессов в Крыму в XX веке – начале XXI века / В. А. Боков [и др.]. Симферополь : ДОЛЯ, 2010. 304 с. ISBN 978-966-366-320-3. EDN WYSLEF.
187. Угаров И.С. Радиационный баланс леса Центральной Якутии // Научный альманах: Науки о Земле. 2018. № 9–2(47). С. 128.
188. Фатерыга В.В. Эколого-биологическая структура флоры высокооможжевеловых лесов Южного берега Крыма в условиях рекреационного воздействия // Экосистемы, их оптимизация и охрана. 2010. № 3(22). С. 21–26. EDN VKVKOX.
189. Физические свойства воздуха: плотность, вязкость, удельная теплоемкость [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<http://thermalinfo.ru/svojstva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svojstva-vozduha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya> (accessed on 8 August 2023).

190. Фомин Э.С., Фомина Т.И. Фенологические реакции многолетних растений на изменение климата в Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2023. Т. 30. № 6. С. 760-772.

191. Фурса Д.И., Корсакова С.П., Амирджанов А.Г., Фурса В.П. Радиационный и гидротермический режим Южного берега Крыма по данным агрометеостанции «Никитский сад» за 1930–2004 гг. и его учет в практике виноградарства. Ялта: НБС, 2006. 55 с.

192. Чернодубов А. И., Руденок Я. Г. Биоразнообразие фитоценозов заповедника «Утриш» // Лесотехнический журнал. 2015. Т. 5, № 1(17). С. 120–127. DOI 10.12737/11269. EDN TVXUDD.

193. Чильчигешева И. В. Геоинформационная система по ландшафтам Командорских островов для научных и образовательных целей // Открытое и дистанционное образование. 2020. № 1(77). С. 25–30.

194. Чумакова М.С. О ночном ходе эффективного излучения на Карадаге // Труды ГГО. 1947. Выпуск 5. С. 25–31.

195. Шатко В. Г., Миронова Л.П. Конспект флоры хребта Тепе-Оба (Крым) // Бюллетень Главного ботанического сада. 2011. № 197. С. 43–70. EDN TMFBJD.

196. Шеляг-Сосонко Ю. Р., Дідух Я. П. Рідколісся ялівцю високого (*Junipereta excelsae*) Криму та аналіз їх флори // Український ботанічний журнал. 1975. Т. 32, № 6. С. 753–762.

197. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. 829 с.

198. Эчедеи Й.Й. Влияние изменений климата на адаптивность садовых растений // Садоводство и виноградарство. 2005. № 5. С. 9-10.

199. Юдин В.В. Геологическая карта и разрезы Горного, Предгорного Крыма. Масштаб 1:200000. Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2018. 2 листа.

200. Abdullah A.Y.M., Masrur A., Adnan M.S.G., Baky M.A.A., Hassan Q.K., Dewan A. Spatio-Temporal Patterns of Land Use/Land Cover Change in the Heterogeneous Coastal Region of Bangladesh between 1990 and 2017 // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. Article number: 790. <https://doi.org/10.3390/rs11070790>.
201. Adkins, C.J. Balance Thermodynamics. [Electronic resource]. Available online: <https://archive.org/details/equilibriumtherm0000adki> (accessed on 8 August 2023).
202. Aguiillaume L., Izquieta-Rojano S., García-Gómez H., Elustondo D., Santamaría J., Alonso R., Avila A. Dry deposition and canopy uptake in Mediterranean holm-oak forests estimated with a canopy budget model: A focus on N estimations // *Atmospheric Environment*. 2017. Vol. 152. pp. 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.038>.
203. Ander T. Earth's Balanced Climates in View of Their Energy Budgets. Available online: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-568771/v1> (accessed on 8 August 2023). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-568771/v1>
204. Bacciu V., Hatzaki M., Karali A., Cauchy A., Giannakopoulos C., Spano D., Briche E. Investigating the Climate-Related Risk of Forest Fires for Mediterranean Islands' Blue Economy // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Article number: 10004. <https://doi.org/10.3390/su131810004>.
205. Baldocchi D.D., Ma S., Rambal S., Misson L., Ourcival J-M., Limousin J-M., Papale J., Dario P. On the differential advantages of evergreenness and deciduousness in Mediterranean oak woodlands: a flux perspective // *Ecological Applications*. 2010. Vol. 20. No. 6. pp. 1583–1597. <https://doi.org/10.1890/08-2047>.
206. Banerjee A., Chen R., E. Meadows M., Singh R.B., Mal S., Sengupta D. An Analysis of Long-Term Rainfall Trends and Variability in the Uttarakhand Himalaya Using Google Earth Engine // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Article number: 709. <https://doi.org/10.3390/rs12040709>.
207. Barbour M., Keeler-Wolf T., Schoenherr A.A. Terrestrial vegetation of California. California: University of California Press, 2007. pp. 730. [Electronic

resource]. Available online: <http://books.google.com/books?id=YNAWPSMm2CUC> (accessed on 8 August 2023).

208. Baret F., Guyot G., Major D. TSAVI: A Vegetation Index Which Minimizes Soil Brightness Effects On LAI And APAR Estimation // Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 1989. Vol. 3. pp. 1355–1358. <https://doi.org/10.1109/igarss.1989.576128>.

209. Baudena M., Santana V.M., Baeza M.J., Bautista S., Eppinga M.B., Hemerik L., Mayor A.G., Rodriguez F., Valdecantos A., Vallejo V.R., et al. Increased aridity drives post-fire recovery of Mediterranean forests towards open shrublands // New Phytologist. 2019. Vol. 225. pp. 1500–1515. <https://doi.org/10.1111/nph.16252>.

210. Beard J.S., Beeston G.R., Harvey J.M., Hopkins A.J.M., Shepherd D.P. The vegetation of Western Australia at the 1:3.000.000 scale. Explanatory memoir Second edition // Conservation Science Western Australia. 2013. Vol. 9 (1). pp. 1–152.

211. Belay A.S., Fenta A.A., Yenehun A., Nigate F., Tilahun S.A., Moges M.M., Dessie M., Adgo E., Nyssen J., Chen M., Griensven A. V., Walraevens K. Evaluation and Application of Multi-Source Satellite Rainfall Product CHIRPS to Assess Spatio-Temporal Rainfall Variability on Data-Sparse Western Margins of Ethiopian Highlands // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Article number: 2688. <https://doi.org/10.3390/rs11222688>.

212. Bellot J., Escarre A. Stemflow and throughfall determination in a resprouted Mediterranean holm-oak forest // Annales des sciences forestières. EDP Sciences, 1998. Vol. 55. No. 7. pp. 847–865. <https://doi.org/10.1051/forest:19980708>.

213. Bentekhici N., Bellal S.-A., Zegrar A. Contribution of remote sensing and GIS to mapping the fire risk of Mediterranean forest: case of the forest massif of Tlemcen (North-West Algeria) // Natural Hazards. 2020. Vol. 104. pp. 811–831. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04191-6>.

214. Bhattacharya B.K., Mallick K., Desai D., Bhat G.S., Morrison R., Cleverly J.R., Woodgate W., Beringer J., Cawse-Nicholson K., Ma S., Verfaillie J., Baldocchi D. A coupled ground heat flux–surface energy balance model of evaporation using thermal remote sensing observations // *Biogeosciences*. 2022. Vol. 19. pp. 5521–5551. <https://doi.org/10.5194/bg-19-5521-2022>.
215. Blondel J. The ‘Design’ of Mediterranean Landscapes: A Millennial Story of Humans and Ecological Systems during the Historic Period // *Human Ecology*. 2006. Vol. 34. pp. 713–729. <https://doi.org/10.1007/s10745-006-9030-4>.
216. Blondel J., Aronson J. Biodiversity and Ecosystem Function in the Mediterranean Basin: Human and Non-Human Determinants // *Ecological Studies*. 1995. Vol 109. pp. 43-120. https://doi.org/10.1007/978-3-642-78881-9_2
217. Bocharnikov M. V., Petrushina M. N., Suslova E. G. Spatial Organization of the Vegetation and Landscapes of the Sub-Mediterranean Forest and Woodland Belt on the Abrau Peninsula (Northwestern Caucasus) // *Arid Ecosystems*. 2019. Vol. 9. No. 4. pp. 237–247. <https://doi.org/10.1134/s2079096119040024>.
218. Böhler J.E., Schaepman M.E., Kneubühler M. Crop Classification in a Heterogeneous Arable Landscape Using Uncalibrated UAV Data // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. Article number: 1282. <https://doi.org/10.3390/rs10081282>.
219. Brancalion P.H., Garcia L.C., Loyola R., Rodrigues R.R., Pillar V.D., Lewinsohn T.M. A critical analysis of the Native Vegetation Protection Law of Brazil (2012): updates and ongoing initiatives // *Natureza Conservação*. 2016. Vol. 14. pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2016.03.003>.
220. Brunt D. Notes on radiation in the atmosphere, I. // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1932. Vol. 58. pp. 389–418. <https://doi.org/10.1002/qj.49705824704>.
221. Carbon Brief (2018), "Explainer: How 'Shared Socioeconomic Pathways' explore future climate change", available at: <https://www.carbonbrief.org> [Accessed 4 March 2020].

222. CDIAC, 2017. Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC). Available at: https://cdiac.essdive.lbl.gov/trace_gas_emissions.html [Accessed 10 January 2022].
223. Cervera T., Pino J., Marull J., Padró R., Tello E. Understanding the long-term dynamics of forest transition: From deforestation to afforestation in a Mediterranean landscape (Catalonia, 1868–2005) // *Land Use Policy*. 2019. Vol. 80. pp. 318–331. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.10.006>.
224. Chergui B., Fahd S., Santos X. *Quercus suber* forest and *Pinus* plantations show different post-fire resilience in Mediterranean north-western Africa // *Annals of Forest Science*. 2018. Vol. 75. Article number: 64. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0742-6>.
225. Chouvardas D., Karatassiou M., Stergiou A., Chrysanthopoulou G. Identifying the Spatiotemporal Transitions and Future Development of a Grazed Mediterranean Landscape of South Greece // *Land*. 2022. Vol. 11. Article number: 2141. <https://doi.org/10.3390/land11122141>.
226. Christen A., Novak M.D., Black A.T., Brown M. The budget of turbulent kinetic energy within and above a sparse Lodgepole Pine stand. [Electronic resource]. Available online: https://www.researchgate.net/publication/51995947_The_budget_of_turbulent_kinetic_energy_within_and_above_a_sparse_Lodgepole_Pine_stand (accessed on 8 August 2023).
227. CIESIN (2019) 'Representative Concentration Pathways (RCPs)', Socio-Economic Data and Scenarios. Available at: https://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html (Accessed: 29 October 2024).
228. Clark John O.E. The Essential Dictionary of Science. [Electronic resource]. Available online: <https://archive.org/details/essentialdiction0000unse> (accessed on 8 August 2023).

229. Collins, M. et al. (2014), "Executive summary", in Chapter 12: Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility, in IPCC AR5 WG1, p. 1033.

230. Commonwealth of Australia (2013), Climate Change Mitigation Scenarios: Modeling report provided to the Climate Change Authority in support of its Caps and Targets Review, available at: <https://www.environment.gov.au/system/files/resources/a28424ae-cce9-48c9-aad2-56b3db0920a5/files/climate-change-mitigation-scenarios.pdf> [Accessed 13 December 2018].

231. Coreau A., Martin J.-L. Multi-scale study of bird species distribution and of their response to vegetation change: a Mediterranean example // *Landscape Ecology*. 2007. Vol. 22. pp. 747–764. <https://doi.org/10.1007/s10980-006-9074-2>.

232. Coşkun M., Coşkun S. An Analysis on the Distribution of Maquis-Shrubland: Karabuk-Safranbolu Basin (Turkey) // *International Journal of Science*. 2017. Vol. 3. pp. 63–70. <https://doi.org/10.18483/ijSci.1336>.

233. Costa A., Madeira M., Santos J.L., Oliveira Â. Change and dynamics in Mediterranean evergreen oak woodlands landscapes of Southwestern Iberian Peninsula // *Landscape and Urban Planning*. 2011. Vol. 102. Issue 3. pp. 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.04.002>.

234. Crevecœur F., Bollens B., Detrembleur C., Lejeune T. Towards a “gold-standard” approach to address the presence of long-range auto-correlation in physiological time series // *Journal of Neuroscience Methods*. 2010. Vol. 192. pp. 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2010.07.017>.

235. Crippen R. E. Calculating the vegetation index faster // *Remote Sensing of Environment*. 1990. Vol. 34. pp. 71–73. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90085-z](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90085-z).

236. Cristóbal J., Poyatos R., Ninyerola M., Llorens P., Pons X. Combining remote sensing and GIS climate modelling to estimate daily forest evapotranspiration in a Mediterranean mountain area // *Hydrology and Earth System*

Sciences. 2011. Vol. 15(5). pp. 1563–1575. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1563-2011>.

237. Damesin C., Rambal S. Field study of leaf photosynthetic performance by a Mediterranean deciduous oak tree (*Quercus pubescens*) during a severe summer drought // New Phytologist. 1995. Vol. 131(2). pp. 159–167. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1995.tb05717.x>.

238. de Dios R.S., Velázquez J., Ollero H.S. Classification and mapping of Spanish Mediterranean mixed forests // iForest – Biogeosciences and Forestry. 2019. Vol. 12. pp. 480–487. <https://doi.org/10.3832/ifer2817-012>.

239. Delgado-Artés, Garófano-Gómez V., Oliver-Villanueva J.V., Rojas-Briales E. Land use/cover change analysis in the Mediterranean region: a regional case study of forest evolution in Castelló (Spain) over 50 years // Land Use Policy. 2022. Vol. 114. Article number: 105967. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105967>.

240. Dhillon M.S., Kübert-Flock C., Dahms T., Rummler T., Arnault J., Steffan-Dewenter I., Ullmann T. Evaluation of MODIS, Landsat 8 and Sentinel-2 Data for Accurate Crop Yield Predictions: A Case Study Using STARFM NDVI in Bavaria, Germany // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Article number: 1830. <https://doi.org/10.3390/rs15071830>.

241. Di Gennaro S.F., Toscano P., Gatti M., Poni S., Berton A., Matese A. Spectral Comparison of UAV-Based Hyper and Multispectral Cameras for Precision Viticulture // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. No. 3. Article number: 449. <https://doi.org/10.3390/rs14030449>.

242. Eddy S., Milantara N., Sasmito S.D., Kajita T., Basyuni M. Anthropogenic Drivers of Mangrove Loss and Associated Carbon Emissions in South Sumatra, Indonesia // Forests. 2021. Vol. 12. Article number: 187. <https://doi.org/10.3390/f12020187>.

243. Elvidge C. D., Lyon R. J. Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass // Remote Sensing of Environment. 1985. Vol. 17. pp. 265–279. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90099-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90099-9).

244. Ermakov N., Plugatar Y., Korzhenevskiy V., Ermakova E. Phytocoenotic map to evaluate plant diversity in eastern Crimea // *Acta Horticulturae*. 2021a. pp. 225–232. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2021.1324.35>. EDN WWQSZB.
245. Ermakov N.B., Pestunov I.A., Korzhenevskiy V.V., Ermakova E.V., Rylov S.A., Trusheva N.A. Study of the diversity and mapping of xerophytic vegetation of the southeastern coast of Crimea peninsula using remote sensing data // *CEUR Workshop Proceedings*. Novosibirsk, 2021b. pp. 437–445. <https://doi.org/10.25743/sdm.2021.54.38.052>. EDN FFUNLO.
246. Fan D., Ni L., Jiang X., Fang S., Wu H., Zhang X. (2020). Spatiotemporal analysis of vegetation changes along the Belt and Road Initiative region from 1982 to 2015 // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. pp. 122579–122588. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007073>.
247. Fawcett, A.A., Iyer, G.C., Clarke, L.E., Edmonds, J.A., Hultman, N.E., McJeon, H.C., Rogelj, J., Schuler, R., Alsalam, J., Asrar, G.R., Creason, J., Jeong, M., McFarland, J., Mundra, A. and Shi, W., 2015. Can Paris pledges avert severe climate change? *Science*, 350(6265), pp. 1168–1169. doi:10.1126/science.aad5761.
248. Fedorov V.M., Gorbunov R.V., Gorbunova T.Y., Kononova N.K. Long-term air temperature variability on the Crimean Peninsula // *Geography and Natural Resources*. 2017. Vol. 38. pp. 86–92. <https://doi.org/10.1134/S1875372817010115> EDN YVWWIR.
249. Feng D., Fu M., Sun Y., Bao W., Zhang M., Zhang Y., Wu J. How Large-Scale Anthropogenic Activities Influence Vegetation Cover Change in China? A Review // *Forests*. 2021. Vol. 12. Article number: 320. <https://doi.org/10.3390/f12030320>.
250. Figueres, C., Schellnhuber, H.J., Whiteman, G. and Rockström, J. (2017), "Three years to safeguard our climate", *Nature*, 546(7660), pp. 593–595. doi:10.1038/546593a.
251. Fischer, G., et al. (2007), "Ecosystem Services and the Millennium Ecosystem Assessment", *Ecosystem Services*, 1(1), pp. 1–14.

252. Forner A., Morán-López T., Flores-Rentería D., Aranda I., Valladares F. Fragmentation reduces severe drought impacts on tree functioning in holm oak forests // *Environmental and Experimental Botany*. 2020. Vol. 173. Article number: 104001. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104001>.
253. Fuchs S., Beardsmore G., Chiozzi P., Espinoza-Ojeda O.M., Gola G., Gosnold W., Harris R., Jennings S., Liu S., Negrete-Aranda R., Neumann F., Norden B., Poort J., Rajver D., Ray L., Richards M., Smith J.D., Tanaka A., Verdoya M. A new database structure for the IHFC Global Heat Flow Database // *International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics*. 2021. Vol. 4. pp. 1–14. <https://doi.org/10.31214/ijthfa.v4i1.62>
254. Funk Chris, Peterson Pete, Landsfeld Martin, Pedreros Diego, Verdin James, Shukla Shraddhanand, Husak Gregory, Rowland James, Harrison Laura, Hoell Andrew, Michaelsen Joel. The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations - a new environmental record for monitoring extremes // *Scientific Data*. 2015. Vol. 2. Article number: 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
255. Furukawa F., Laneng L. A., Ando H., Yoshimura, N., Kaneko M., Morimoto J. Comparison of RGB and multispectral unmanned aerial vehicle for monitoring vegetation coverage changes on a landslide area // *Drones*. 2021. Vol. 5. №. 3. Article number: 97. <https://doi.org/10.3390/drones5030097>.
256. Gallardo-Salazar J. L., Pompa-García M. Detecting individual tree attributes and multispectral indices using unmanned aerial vehicles: Applications in a pine clonal orchard // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. №. 24. Article number: 4144. <https://doi.org/10.3390/rs12244144>.
257. Gandhi G. M., Parthiban B. S., Thummalu N., Christy A. NDVI: Vegetation change detection using remote sensing and GIS—A case study of Vellore District // *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 57. pp. 1199–1210. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.415>.
258. García-Gómez H., Izquieta-Rojano S., Aguiillaume L., González-Fernández I., Valiño F., Elustondo D., Santamaría J.M., Àvila A., Bytnerowicz A., Bermejo V., et al. Joining empirical and modeling approaches to estimate dry

deposition of nitrogen in Mediterranean forests // *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 243. pp. 427–436. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.015>.

259. Garrett B., Anderson K. Drone methodologies: Taking flight in human and physical geography // *Transactions of the Institute of British Geographers*. 2018. Vol. 43(3). pp. 341–359. <https://doi.org/10.1111/tran.12232>.

260. Geri F., Amici V., Rocchini D. Human activity impact on the heterogeneity of a Mediterranean landscape // *Applied geography*. 2010. Vol. 30. №. 3. pp. 370–379. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.10.006>.

261. Ghorbanian A., Mohammadzadeh A., Jamali S. Linear and Non-Linear Vegetation Trend Analysis throughout Iran Using Two Decades of MODIS NDVI Imagery // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Article number: 3683. <https://doi.org/10.3390/rs14153683>.

262. Gonçalves, A.C., Sousa, A.M. The Fire in the Mediterranean Region: A Case Study of Forest Fires in Portugal. [Electronic resource]. Available online: <https://doi.org/10.5772/intechopen.69410>. (accessed on 8 August 2023).

263. Gorbunov R. Productivity dynamics of oak forests of the Crimean Peninsula // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 169. Article number: 03007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016903007>.

264. Gorbunov R., Gorbunova T., Kononova N., Priymak A., Salnikov A., Drygval A., Lebedev Y. Spatiotemporal aspects of interannual changes in precipitation in Crimea // *Journal of Arid Environments*. 2020. Vol. 183. Article number: 104280. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104280>.

265. Gorbunov R., Tabunshchik V., Gorbunova T., Safonova M. Water Balance Components of Sub-Mediterranean Downy Oak Landscapes of Southeastern Crimea // *Forests*. 2022. Vol. 13. Article number: 1370. <https://doi.org/10.3390/f13091370>.

266. Guisan, A. and Thuiller, W. (2005), "Predicting species distribution: offering more than simple habitat models", *Ecology Letters*, 8, pp. 993–1009.

267. Han W., Chen D., Li H., Chang Z., Chen J., Ye L., Liu S., Wang Z. Spatiotemporal Variation of NDVI in Anhui Province from 2001 to 2019 and Its

Response to Climatic Factors // *Forests*. 2022. Vol. 13. Article number: 1643. <https://doi.org/10.3390/f13101643>.

268. Hernández A., Miranda M., Arellano E.C., Saura S., Ovalle C. Landscape dynamics and their effect on the functional connectivity of a Mediterranean landscape in Chile // *Ecological Indicators*. 2005. Vol. 48. pp. 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.010>.

269. Hernandez-Escobedo Q., Franco J.A., Perea-Moreno A.-J. GIS-Based Wind and Solar Power Assessment in Central Mexico // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Article number: 12800. <https://doi.org/10.3390/app122412800>.

270. Hidalgo-Triana N., Solakis A., Casimiro-Soriguer F., Choe H., Navarro T., Pérez-Latorre A.V., Thorne J.H. The high climate vulnerability of western Mediterranean forests // *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 895. Article number: 164983. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164983>.

271. Hobbs, R.J. Remote Sensing of Spatial and Temporal Dynamics of Vegetation // *Remote Sensing of Biosphere Functioning*. 1990. Vol. 79. pp. 203–219. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3302-2_10.

272. Höll M., Kantz H., Zhou Y. Detrended fluctuation analysis and the difference between external drifts and intrinsic diffusion-like nonstationarity // *Physical Review E*. 2016. Vol. 94. Article number: 042201. <https://doi.org/10.1103/physreve.94.042201>.

273. Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E., Gao X., Ferreira L. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 83. P. 195–213. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(02)00096-2).

274. Huete A., Jackson R., Post D. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds // *Remote Sensing of Environment*. 1985. Vol. 17. pp. 37–53. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90111-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90111-7).

275. Hutchinson G.E. Concluding Remarks // *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*. 1957. Vol. 22. pp. 415–427. <https://doi.org/10.1101/sqb.1957.022.01.039>.

276. Iacopetti G., Bussotti F., Selvi F., Maggino F., Pollastrini M. Forest ecological heterogeneity determines contrasting relationships between crown defoliation and tree diversity // *Forest Ecology and Management*. 2019. Vol. 448. pp. 321–329. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.06.017>.
277. Iizuka K., Itoh M., Shiodera S., Matsubara T., Dohar M., Watanabe K. Advantages of unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry for landscape analysis compared with satellite data: A case study of postmining sites in Indonesia // *Cogent Geoscience*. 2018. Vol. 4(1). Article number: 1498180. <https://doi.org/10.1080/23312041.2018.1498180>.
278. International Energy Agency (2008), *World Energy Outlook 2008 Fact Sheet*, available at: http://www.iea.org/weo/docs/weo2008/fact_sheets_08.pdf [Archived 17 November 2008].
279. IPCC (2007), "Annex", in *Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, B. Metz et al. (eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. Archived from the original on 5 October 2018. Retrieved 20 May 2009.
280. IPCC (2014), "Topic 2: Future changes, risks and impacts", in *IPCC 5th Assessment Synthesis Report*, Box 2.2, figure 1.
281. IPCC (2021), *Climate Change 2021 - The Physical Science Basis*, available at: <https://ipcc.ch> [Archived from the original on 13 August 2021].
282. IPCC (n.d.), "Representative Concentration Pathways (RCPs)", available at: <https://www.ipcc.ch> [Accessed 13 February 2019].
283. IPCC, 2018. *Special Report on Global Warming of 1.5°C*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Incheon, Republic of Korea. Available at: <https://www.ipcc.ch/sr15/> [Accessed 7 October 2018].
284. : *Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.005.

285. IPCC, 2022. Annex I: Glossary, in van Diemen, R., Matthews, J.B.R., Möller, V., Fuglestvedt, J.S., Masson-Delmotte, V., Méndez, C., Reisinger, A. and Semenov, S. (eds), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi:10.1017/9781009157926.020.

286. IPCC, 2023. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

287. Iverson, L.R., Prasad, A.M., Matthews, S. and Hoover, C.M. (2009), "Potential changes in habitat suitability under climate change: Lessons learned from 15 years of species modelling", XIII World Forestry Congress, October.

288. Iverson, L.R., Prasad, A.M., Matthews, S.N. and Peters, M.P. (2010), "Merger of three modeling approaches to assess potential effects of climate change on trees in the eastern United States", October.

289. Jakovljević Tamara, Marchetto Aldo, Lovreškov Lucija, Potočić Nenad, Seletković Ivan, Indir Krunoslav, Jelić Goran, Butorac Lukrecija, Zgrablić Željko, De Marco Alessandra, Simioni Guillaume, Ognjenović Mladen, Tušek Ana Jurinjak. *Assessment of Atmospheric Deposition and Vitality Indicators in Mediterranean Forest Ecosystems // Sustainability*. 2019. Vol. 11. Article number: 6805. <https://doi.org/10.3390/su11236805>.

290. Jełowicki Ł., Sosnowicz K., Ostrowski W., Osińska-Skotak K., Bakula K. *Evaluation of Rapeseed Winter Crop Damage Using UAV-Based Multispectral Imagery // Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Article number: 2618. <https://doi.org/10.3390/rs12162618>.

291. Jiang F., Deng M., Long Y., Sun H. *Spatial pattern and dynamic change of vegetation greenness from 2001 to 2020 in Tibet, China // Frontiers in Plant*

Science. 2022. Vol. 13. Article number: 892625.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.892625>.

292. Jiang F., Kutia M., Ma K., Chen S., Long J., Sun H. Estimating the aboveground biomass of coniferous forest in Northeast China using spectral variables, land surface temperature and soil moisture // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 785. Article number: 147335.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147335>.

293. Jiang L., Bao A., Guo H., Ndayisaba F. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia // *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 599. pp. 967–980.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.012>.

294. Johnson D.M., Rosales A., Mueller R., Reynolds, C., Frantz R., Anyamba A., Pak E., Tucker C. USA Crop Yield Estimation with MODIS NDVI: Are Remotely Sensed Models Better than Simple Trend Analyses? // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Article number: 4227. <https://doi.org/10.3390/rs13214227>.

295. Jordan C.F. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor // *Ecology*. 1969. Vol. 50. pp. 663–666.
<https://doi.org/10.2307/1936256>.

296. Kalisa W., Igbawua T., Henchiri M., Ali S., Zhang S., Bai Y., Zhang J. Assessment of climate impact on vegetation dynamics over East Africa from 1982 to 2015 // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. Article number: 1–20.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-53150-0>.

297. Kamble M.V., Ghosh K., Rajeevan M., Samui R.P. Drought monitoring over India through Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) // *MAUSAM*. 2010. Vol. 61. P. 537–546. <https://doi.org/10.54302/mausam.v61i4.911>.

298. Kang Y., Guo E., Wang Y., Bao Y., Bao Y., Mandula N. Monitoring Vegetation Change and Its Potential Drivers in Inner Mongolia from 2000 to 2019 // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Article number: 3357.
<https://doi.org/10.3390/rs13173357>.

299. Kantelhardt JW. Fractal And Multifractal Time Series // Mathematics of complexity and dynamical systems. New York: Springer, 2011. pp. 463–487. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1806-1_30.
300. Kauth R. J., Thomas G. S. The tasseled Cap – A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by Landsat // Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data. Indiana: Purdue University of West Lafayette, 1976. Vol. 4B. pp. 41–51.
301. Kavgacı A., Balpınar N., Öner H.H., Arslan M., Bonari G., Chytrý M., Čarni A. Classification of forest and shrubland vegetation in Mediterranean Turkey // Applied Vegetation Science. 2021. Vol. 24. Article number: e12589. <https://doi.org/10.1111/avsc.12589>.
302. Keleş S., Durusoy I., Çakır G. Analysis of the changes in forest ecosystem functions, structure and composition in the Black Sea region of Turkey // Journal of Forest Research. 2016. Vol. 28. pp. 329–342. <https://doi.org/10.1007/s11676-016-0322-2>.
303. Keshta A.E., Riter J.C.A., Shaltout K.H., Baldwin A.H., Kearney M., Sharaf El-Din A., Eid E.M. Loss of Coastal Wetlands in Lake Burullus, Egypt: A GIS and Remote-Sensing Study // Sustainability. 2022. Vol. 14. Article number: 4980. <https://doi.org/10.3390/su14094980>.
304. Koba V.P., Plugatar Y.V., Shevchuk O.M., Leyba V.D., Sakhno T.M. Growth Features of *Castanea sativa* Mill. in Forest Stands Infected by *Cryphonectria parasitica* (Murrill) M. E. Barr. in Abkhazia // Doklady Biological Sciences. 2020. Vol. 491. pp. 54–56. <https://doi.org/10.1134/s0012496620020052>.
305. Kondratyev K. J., Manolova M. P. The radiation balance of slopes // Solar Energy. 1960. Vol. 4 (1). pp. 14–19.
306. Köse S., Başkent E.Z. Investigating the 40-Year Legacy of Forest Management Plans in Eastern Black Sea Forests of Turkey // Journal of Sustainable Forestry. 2001. Vol. 14. pp. 1–19. https://doi.org/10.1300/j091v14n02_01.
307. Lan Y., Huang Z., Deng X., Zhu Z., Huang H., Zheng Z., Lian B., Zeng G., Tong Z. Comparison of machine learning methods for citrus greening detection

on UAV multispectral images // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 171. Article number: 105234. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105234>.

308. Landsberg P.T. *Thermodynamics and Statistical Mechanics*. Oxford: Oxford University Press, 1978. p. 11.

309. Leng, W., He, H.S., Bu, R., Wang, X. and others (2008), "Predicting the distributions of suitable habitat for three larch species under climate warming in Northeastern China", *Forest Ecology and Management*, 254(3), pp. 420-428. doi:10.1016/j.foreco.2007.08.031.

310. Li C., Jia X., Zhu R., Mei X., Wang D., Zhang X. Seasonal Spatiotemporal Changes in the NDVI and Its Driving Forces in Wuliangsu Lake Basin, Northern China from 1990 to 2020 // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Article number: 2965. <https://doi.org/10.3390/rs15122965>.

311. Li M., Yan Q., Li G., Yi M., Li J. Spatio-Temporal Changes of Vegetation Cover and Its Influencing Factors in Northeast China from 2000 to 2021 // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Article number: 5720. <https://doi.org/10.3390/rs14225720>.

312. Li P., Wang J., Liu M., Xue Z., Bagherzadeh A., Liu M. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate on the Loess Plateau from 1985 to 2015 // *Catena*. 2021. Vol. 203. Article number: 105331. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105331>.

313. Li Z., Chen Y., Li W., Deng H., Fang G. Potential impacts of climate change on vegetation dynamics in Central Asia // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015. Vol. 120, No. 24. pp. 12345–12356. <https://doi.org/10.1002/2015JD023618>.

314. Librán-Embida F., Klaus F., Tschardt T., Grass I. Unmanned aerial vehicles for biodiversity-friendly agricultural landscapes-A systematic review // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 732. Article number: 139204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139204>.

315. Liu B., Pan L., Qi Y., Guan X., Li J. Land Use and Land Cover Change in the Yellow River Basin from 1980 to 2015 and Its Impact on the Ecosystem

Services // Land. 2021. Vol. 10. Article number: 1080.
<https://doi.org/10.3390/land10101080>.

316. Liu D., Ogaya R., Barbeta A., Yang X., Peñuelas J. Long-term experimental drought combined with natural extremes accelerate vegetation shift in a Mediterranean holm oak forest // *Environmental and Experimental Botany*. 2018. Vol. 151. pp. 1–11.

317. Llorens P., Francisco D. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions: A review of studies in Europe // *Journal of Hydrology*. 2007. Vol. 335, Issues 1–2. pp. 37–54.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.032>.

318. Lloret F., Calvo E., Pons X., Díaz-Delgado R. Wildfires and landscape patterns in the Eastern Iberian Peninsula // *Landscape Ecology*. 2002. Vol. 17. pp. 745–759.

319. Long Q., Wang F., Ge W., Jiao F., Han J., Chen H., Roig F.A., Abraham E.M., Xie M., Cai L. Temporal and Spatial Change in Vegetation and Its Interaction with Climate Change in Argentina from 1982 to 2015 // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Article number: 1926. <https://doi.org/10.3390/rs15071926>.

320. Lu H., Fan T., Ghimir P., Deng L. Experimental evaluation and consistency comparison of UAV multispectral minisensors // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 16. Article number: 2542. <https://doi.org/10.3390/rs12162542>.

321. Lupyan E. A., Bartalev S. A., Krashenninnikova Yu, S., Plotnikov D. E., Tolpin V. A., Uvarov I. A. Analysis of winter crops development in the southern regions of the European part of Russia in spring of 2018 with use of remote monitoring // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. Vol. 15, No. 2. pp. 272–276. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-272-276>.

322. Lyon, C., Saupe, E.E., Smith, C.J., Hill, D.J., Beckerman, A.P., Stringer, L.C., Marchant, R., McKay, J., Burke, A., O'Higgins, P., Dunhill, A.M., Allen, B.J., Riel-Salvatore, J. and Aze, T. (2022), "Climate change research and

action must look beyond 2100", *Global Change Biology*, 28(2), pp. 349–361. doi:10.1111/gcb.15871.

323. Marchi M., Castellanos-Acuna D., Hamann A., Wang T., Ray D. Menzel A. ClimateEU, scale-free climate normals, historical time series, and future projections for Europe // *Scientific Data*. 2020. Vol. 7. Article number: 428. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00763-0>.

324. Marino C., Manca G., Matteucci G., Mugnozza G.S. Climate change in the Mediterranean basin: a case study on carbon cycle in a forest of southern Italy // *Forest@ – Journal of Silviculture and Forest Ecology*. 2005. Vol. 2. pp. 52–65. <https://doi.org/10.3832/efor0259-0020052>.

325. Matsushita B., Yang W., Chen J., Onda Y., Qiu G. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-density Cypress Forest // *Sensors*. 2007. Vol. 7. pp. 2636–2651. <https://doi.org/10.3390/s7112636>.

326. Mayeux H. S., Johnson H. B., Polley H. W. Global change and vegetation dynamics // *Noxious range weeds*. Boca Raton: CRC Press.1992. pp. 62–74

327. McComb, B. and Duncan, S. (2007), *Biodiversity Conservation in Contemporary Landscapes, Stressors, and Ranges of Variability: Scientific and Social Views*.

328. McDaniel K. C., Haas R. H. Assessing mesquite-grass vegetation condition from Landsat // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1982. Vol. 48, No. 3. pp. 441–450.

329. McKenney, D., Pedlar, J.H., Lawrence, K., Hutchinson, M.F. and others (2007), "Potential Impacts of Climate Change on the Distribution of North American Trees", *BioScience*, 57(12), pp. 939-948. doi:10.1641/B571106.

330. Meinshausen, M., Nicholls, Z.R.J., Lewis, J., Gidden, M.J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J.G., Daniel, J.S., John, A., Krummel, P.B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S.A., Rayner, P.J., Reimann, S. and Wang, R.H.J. (2020), "The shared socio-economic

pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500", *Geoscientific Model Development*, 13(8), pp. 3571–3605. doi:10.5194/gmd-13-3571-2020.

331. Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K., Daniel, J.S., Kainuma, M.L.T., Lamarque, J.F., Matsumoto, K., Montzka, S.A., Raper, S.C.B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G.J.M. and van Vuuren, D.P.P. (2011), "The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300", *Climatic Change*, 109(1–2), pp. 213–241. doi:10.1007/s10584-011-0156-z.

332. MERRA-2 meteorological re-analysis. [Electronic resource]. Available online: <https://www.soda-pro.com/web-services/meteo-data/merra> (accessed on 8 August 2023).

333. Miles J. *Vegetation Dynamics*. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 1979. 80 p.

334. Modica G., Merlino A., Solano F., Mercurio R. An index for the assessment of degraded Mediterranean forest ecosystems // *Forest Systems*. 2015. Vol. 24. Article number: e037. <https://doi.org/10.5424/fs/2015243-07855>.

335. Molowny-Horas R., Basnou C., Pino J. A multivariate fractional regression approach to modeling land use and cover dynamics in a Mediterranean landscape // *Computers, Environment and Urban Systems*. 2015. Vol. 54. pp. 47–55.

336. Morán-Ordóñez A., Ramsauer J., Coll L., Brotons L., Ameztegui A. Ecosystem services provision by Mediterranean forests will be compromised above 2°C warming // *Global Change Biology*. 2021. Vol. 27. pp. 4210–4222. <https://doi.org/10.1111/gcb.15745>.

337. Morán-Ordóñez A., Rocas-Díaz J.V., Otsu K., Ameztegui A., Coll L., Lefevre F., Retana J., Brotons L. The use of scenarios and models to evaluate the future of nature values and ecosystem services in Mediterranean forests // *Regional Environmental Change*. 2018. Vol. 19. pp. 415–428. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1408-5>.

338. Moreno-de-las-Heras M., Lindenberger F., Latron J., Lana-Renault N., Llorens P., Arnáez J., Romero-Díaz A., Gallart F. Hydro-geomorphological consequences of the abandonment of agricultural terraces in the Mediterranean region: Key controlling factors and landscape stability patterns // *Geomorphology*. 2019. Vol. 333. pp. 73–91.

339. Moriondo, M., Stefanini, F.M. and Bindi, M. (2008), "Reproduction of olive tree habitat suitability for global change impact assessment", *Ecological Modelling*, 218(1-2), pp. 95-109. doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.06.024.

340. Morita, T., et al. (2001), "Greenhouse Gas Emission Mitigation Scenarios and Implications", in *Climate Change 2001: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, B. Metz et al. (eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. Archived from the original on 5 October 2018. Retrieved 10 January 2010.

341. Moss, R. et al. (2008), *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.

342. Mu Z., Asensio D., Llusà J., Filella I., Ogaya R., Yi Z., Peñuelas J. Annual and seasonal variations in soil volatile organic compound concentrations in a Mediterranean shrubland and holm oak forest // *Geoderma*. 2022. Vol. 405. Article number: 115401.

343. Muñoz Sabater, J. ERA5-Land Monthly Averaged Data from 1981 to Present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). Available online: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.68d2bb30?tab=overview> (accessed on 8 August 2023).

344. National Atlas of Ukraine / NAS of Ukraine, Institute of geography, State Service of Geodesy, cartography and cadastre, chief editor L. G. Rudenko, Chairman Editor Kol. B. E. Paton. Kiev: Cartography, 2007. 435 p.

345. Njuki S.M., Mannaerts C.M., Su Z. Accounting for Turbulence-Induced Canopy Heat Transfer in the Simulation of Sensible Heat Flux in SEBS Model // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Article number: 1578. <https://doi.org/10.3390/rs15061578>.
346. Nunes L.J.R., Meireles C.I.R., Gomes C.J.P., Ribeiro N.M.C.A. The Impact of Climate Change on Forest Development: A Sustainable Approach to Management Models Applied to Mediterranean-Type Climate Regions // Plants. 2021. Vol. 11. Article number: 69. <https://doi.org/10.3390/plants11010069>.
347. OECD (2011), OECD Environmental Outlook to 2050, Climate Change Chapter, pre-release version, available at: <https://www.oecd.org/environment/Outlook2050.pdf> [Accessed 16 January 2012].
348. Ogaya R., Barbeta A., Başnou C., Peñuelas J. Satellite data as indicators of tree biomass growth and forest dieback in a Mediterranean holm oak forest // Annals of Forest Science. 2014. Vol. 72. pp. 135–144. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0408-y>.
349. Ogaya R., Peñuelas J. Climate Change Effects in a Mediterranean Forest Following 21 Consecutive Years of Experimental Drought // Forests. 2021. Vol. 12. Article number: 306. <https://doi.org/10.3390/f12030306>.
350. Opoku A. Biodiversity and the built environment: Implications for the Sustainable Development Goals (SDGs) // Resources, Conservation and Recycling. 2019. Vol. 141. pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.011>.
351. Orenstein D.E. The Cultural Ecosystem Services of Mediterranean Pine Forests // Pines and Their Mixed Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin. Managing Forest Ecosystems. 2021. Vol. 38. pp. 631–655. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63625-8_30.
352. Ozcelik R. Tree species diversity of natural mixed stands in eastern Black Sea and western Mediterranean region of Turkey // Journal of Environmental Biology. 2009. Vol. 30. pp. 761–766.

353. Pacala, S. and Socolow, R. (2004), "Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies", *Science*, 305(5686), pp. 968–972. doi:10.1126/science.1100103.

354. Paoletti E. UV-B and Mediterranean forest species: Direct effects and ecological consequences // *Environmental Pollution*. 2005. Vol. 137. Issue 3. pp. 372–379.

355. Papadimitriou F. Artificial Intelligence in modelling the complexity of Mediterranean landscape transformations // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2012. Vol. 81. pp. 87–96.

356. Parcerisas L., Marull J., Pino J., Tello E., Coll F., Basnou C. Land use changes, landscape ecology and their socioeconomic driving forces in the Spanish Mediterranean coast (El Maresme County, 1850–2005) // *Environmental Science Policy*. 2012. Vol. 23. pp. 120-132.

357. Partington, J.R. *An Advanced Treatise on Physical Chemistry*. Available online: <https://archive.org/details/advancedtreatise0003jrpa/page/n5/mode/2up> (accessed on 8 August 2023).

358. Peña-Angulo D., Khorchani M., Errea P., Lasanta T., Martínez-Arnáiz M., Nadal-Romero E. Factors explaining the diversity of land cover in abandoned fields in a Mediterranean mountain area // *Catena*. 2019. Vol. 181. Article number: 104064.

359. Peñuelas J., Sardans J., Filella I., Estiarte M., Llusà J., Ogaya R., Carnicer J., Bartrons M., Rivas-Ubach A., Grau O., et al. Impacts of Global Change on Mediterranean Forests and Their Services // *Forests*. 2017. Vol. 8. Article number: 463. <https://doi.org/10.3390/f8120463>.

360. Pérez-Girón J.C., Álvarez-Álvarez P., Díaz-Varela E.R., Lopes D.M.M. Influence of climate variations on primary production indicators and on the resilience of forest ecosystems in a future scenario of climate change: Application to sweet chestnut agroforestry systems in the Iberian Peninsula // *Ecological Indicators*. 2020. Vol. 113. pp. 106199.

361. Perrot P. A to Z of Thermodynamics. Oxford: Oxford University Press. 1998. 329 p.
362. Peters, M.P. (2011), "Assessing Ponderosa Pine (*Pinus ponderosa*) Suitable Habitat throughout Arizona in Response to Future Climate Models".
363. Piao S., Fang J., Zhou L., Zhu B., Tan K., Tao S. Changes in vegetation net primary productivity from 1982 to 1999 in China // *Global Biogeochemical Cycles*. 2005. Vol. 19, No. 2. <https://doi.org/10.1029/2004GB002274>.
364. Potapov P., Hansen M.C., Kommareddy I., Kommareddy A., Turubanova S., Pickens A., Adusei B., Tyukavina A., Ying Q. Landsat Analysis Ready Data for Global Land Cover and Land Cover Change Mapping // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Article number: 426. <https://doi.org/10.3390/rs12030426>.
365. Prigogine I., Defay R. Chemical Thermodynamics. London: Longmans, Green Co. 1954. pp. 22–23.
366. Pugh, T.A.M., Seidl, R., Liu, D., Lindeskog, M., Chini, L.P. and Senf, C. (n.d.), "The anthropogenic imprint on temperate and boreal forest demography and carbon turnover", *Global Ecology and Biogeography*.
367. Qi J., Chehbouni, A., Huete A., Kerr Y., Sorooshian S. A modified soil adjusted vegetation index // *Remote Sensing of Environment*. 1994. Vol. 48. pp. 119–126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1).
368. Quézel F, Médail R, Loisel Barbero M. Biodiversity and conservation of forest species in the Mediterranean basin // *Unasylva*. 1999. Vol. 50, No. 197. pp. 21–28.
369. Rasmussen J., Azim S., Boldsen S. K., Nitschke T., Jensen S. M., Nielsen J., Christensen S. The challenge of reproducing remote sensing data from satellites and unmanned aerial vehicles (UAVs) in the context of management zones and precision agriculture // *Precision Agriculture*. 2021. Vol. 22(3). pp. 834–851. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09759-7>.
370. Requena-Mullor J.M., Reyes A., Escribano P., Cabello J. Assessment of ecosystem functioning from space: Advancements in the Habitats Directive implementation // *Ecological Indicators*. 2018. Vol. 89. pp. 893–902.

371. Riahi, K., Schaeffer, R., Arango, J., Calvin, K., Guivarch, C., Hasegawa, T., Jiang, K., Kriegler, E., Matthews, R., Peters, G.P., Rao, A., Robertson, S., Sebbit, A.M., Steinberger, J., Tavoni, M. and van Vuuren, D.P., 2022. Chapter 3: Mitigation pathways compatible with long-term goals. In: IPCC, 2022. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, P.R. Shukla et al. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

372. Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O. and Lutz, W. (2017), "The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview", *Global Environmental Change*, 42, pp. 153–168. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.

373. Richardson, A. J., Everitt, J. H. Using spectral vegetation indices to estimate rangeland productivity // *Geocarto International*. 1992. Vol. 7, No. 1. pp. 63–69. doi:10.1080/10106049209354353.

374. Riihimäki H., Luoto M., Heiskanen J. Estimating fractional cover of tundra vegetation at multiple scales using unmanned aerial systems and optical satellite data. *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 224. pp. 119–132.

375. Robinson, D.C.E., Beukema, S.J. and Greig, L.A. (2008), *Vegetation models and climate change*, ESSA Technologies and Western Wildlands Threat Assessment Center. doi:10.13140/2.1.2485.6327.

376. Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K.V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., Fujimori, S., Stremler, J., Hasegawa, T., Marangoni, G., Krey, V. (2018), "Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C", *Nature Climate Change*, 8(4), pp. 325–332. doi:10.1038/s41558-018-0091-3.

377. Rogner, H.-H., et al. (2007), "Introduction", in *Climate Change 2007: Mitigation*, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, B. Metz et al. (eds), Cambridge

University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. Archived from the original on 5 October 2018. Retrieved 20 May 2009.

378. Romero-Calcerrada R., Perry G.L.W. The role of land abandonment in landscape dynamics in the SPA 'Encinares del rio Alberche y Cofio' Central Spain, 1984–99 // *Landscape Urban Plann.* 2004. Vol. 66. pp. 217–232.

379. Rouse L. M., Tabaldiev K., Matuzeviciute G. M. Exploring Landscape Archaeology and UAV-Based Survey in the Kochkor Valley, Kyrgyzstan // *Journal of Field Archaeology*. 2022. Vol. 47(1). pp. 32–53.

380. Russo D. Effects of Land Abandonment on Animal Species in Europe: Conservation and Management Implications. Napoli: Università degli Studi de Napoli Federic, 2006. 51 p.

381. Saikia A. NDVI variability in North East India // *Scottish Geographical Journal*. 2009. Vol. 125, No. 2. pp. 195–213. <https://doi.org/10.1080/14702540903071113>.

382. Senf C., Leitão P.J., Pflugmacher D., van der Linden S., Hostert P. Mapping land cover in complex Mediterranean landscapes using Landsat: Improved classification accuracies from integrating multi-seasonal and synthetic imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol. 156. pp. 527–536.

383. Seo, C., Thorne, J.H., Hannah, L. and Thuiller, W. (2008), "Scale effects in species distribution models: Implications for conservation planning under climate change", *Biology Letters*, 5(1), pp. 39-43. doi:10.1098/rsbl.2008.0476.

384. Serra P., Ponsa X., Saurí D. Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors // *Applied Geography*. 2008. Vol. 28. pp. 189–209. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.02.001>.

385. Shadchinov S.M. Dependence of the Normalized Difference Vegetation Index Level on the Spatial Structure of the Landscape and Its Time Variability Using the Example of the West End of the Crimean Peninsula (Tarkhankut Peninsula) // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. Vol. 57. pp. 1586–1595. <https://doi.org/10.1134/s0001433821120185>.

386. Shibani N., Pandey A., Satyam V. K., Bhari J. S., Karimi B. A., Gupta S. K. Study on the variation of NDVI, SAVI and EVI indices in Punjab State, India // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1110, No. 1. Article number: 012070. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012070>.
387. Shinkarenko S., Solodovnikov D., Bartalev S., Vasilchenko A., Vypritskii A. Dynamics of the reservoir's areas of the Crimean Peninsula // Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. 2021. Vol. 18. pp. 226–241. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-226-241>.
388. Sirami C., Nespoulous A., Cheylan J.P., Marty P., Hvenegaard G.T., Geniez P., Schatz B., Martin J.L. Long-term anthropogenic and ecological dynamics of a Mediterranean landscape: Impacts on multiple taxa // Landscape and Urban Planning. 2010. Vol. 96. Issue 4. pp. 214–223.
389. Skorokhod E.Y., Churilova T.Y., Efimova T.V., Moiseeva N.A., Suslin V.V. Bio-Optical Characteristics of the Black Sea Coastal Waters near Sevastopol: Assessment of the MODIS and VIIRS Products Accuracy // Physical Oceanography. 2021. Vol. 28. pp. 215-227. <https://doi.org/10.22449/1573-160x-2021-2-215-227>.
390. Soulis K.X., Generali K.A., Papadaki C., Theodoropoulos C., Psomiadis E. Hydrological Response of Natural Mediterranean Watersheds to Forest Fires // Hydrology. 2021. Vol. 8. Article number: 15. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010015>.
391. Sousa D., Davis F.W. Scalable mapping and monitoring of Mediterranean-climate oak landscapes with temporal mixture models // Remote Sensing of Environment. 2020. Vol. 247. Article number: 111937.
392. Stratmann, T.S.M., Forrest, M., Traylor, W. and Hickler, T. (n.d.), "Adding Ungulate Movement Ecology to a Dynamic Global Vegetation Model".
393. Suárez-Muñoz M., Bonet-García F.J., Navarro-Cerrillo R., Herrero J., Mina M. Forest management scenarios drive future dynamics of Mediterranean planted pine forests under climate change // Landscape Ecology. 2023. Vol. 38. pp. 2069–2084. <https://doi.org/10.1007/s10980-023-01678-y>.

394. Sun G.-Q., Li L., Li J., Liu C., Wu Y.-P., Gao S., Wang Z., Feng G.-L. Impacts of climate change on vegetation pattern: Mathematical modeling and data analysis // *Physics of Life Reviews*. 2022. Vol. 43. pp. 239–270. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2022.09.005>.
395. Sun J., Hou G., Liu M., Fu G., Zhan T., Zhou H., Tsunekawa A., Haregeweyn N. Effects of climatic and grazing changes on desertification of alpine grasslands, Northern Tibet // *Ecological Indicators*. 2019. Vol. 107. Article number: 105647. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105647>.
396. UNFCCC (n.d.), "The Paris Agreement", available at: <https://unfccc.int> [Accessed 18 September 2021]. Archived from the original on 19 March 2021.
397. Tabara D., Sauri D., Cerdan R. Forest fire risk management and public participation in changing socioenvironmental conditions: a case study in a Mediterranean region // *Risk Analysis*. 2003. Vol. 23. pp. 249–260. <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00305>.
398. Tabunshchik V. A. The distribution of the values of the NDVI on the territory of the Razdolnensky district of the Republic of Crimea in January-June 2018 // *Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*. 2019. Vol. 5, No. 2. pp. 225–242.
399. Terez E. I., Terez G. A. Investigation of atmospheric transmission in the Crimea (Ukraine) in the twentieth century // *Journal of Applied Meteorology*. 2002. Vol. 41, No. 10. pp. 1060–1063.
400. Tong S., Zhang J., Bao Y., Lai Q., Lian X., Li N., Bao Y. Analyzing vegetation dynamic trend on the Mongolian Plateau based on the Hurst exponent and influencing factors from 1982–2013 // *Journal of Geographical Sciences*. 2018. Vol. 28. pp. 595–610. <https://doi.org/10.1007/s11442-018-1493-x>.
401. United Nations Economic Commission for Europe (2019) 'SSP2: Middle of the Road - An Overview', Available at: https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/CSE/PATHWAYS/2019/ws_Con_sult_14_15.May.2019/supp_doc/SSP2_Overview.pdf (Accessed: [29.10.24]).

402. USGCRP, 2017. Climate Science Special Report. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, pp. 1-470.

403. Vecellio D.J., Wolf S.T., Cottle R.M., et al. Utility of the Heat Index in defining the upper limits of thermal balance during light physical activity (PSU HEAT Project) // *International Journal of Biometeorology*. 2022. Vol. 66. pp. 1759–1769. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02316-z>.

404. Verrall B., Pickering C. M. Alpine vegetation in the context of climate change: A global review of past research and future directions // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 748. Article number: 141344. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141344>.

405. Wang J., Buttar N.A., Hu Y., Lakhia I.A., Javed Q., Shabbir A. Estimation of Sensible and Latent Heat Fluxes Using Surface Renewal Method: Case Study of a Tea Plantation // *Agronomy*. 2021. Vol. 11. Article number: 179. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010179>.

406. Wang J., Zhao J., Zhou P., Li K., Cao Z., Zhang H., Han Y., Luo Y., Yuan X. Study on the Spatial and Temporal Evolution of NDVI and Its Driving Mechanism Based on Geodetector and Hurst Indexes: A Case Study of the Tibet Autonomous Region // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Article number: 5981. <https://doi.org/10.3390/su15075981>.

407. Wang Y., Zhang Z., Chen X. The Dominant Driving Force of Forest Change in the Yangtze River Basin, China: Climate Variation or Anthropogenic Activities? // *Forests*. 2022. Vol. 13. Article number: 82. <https://doi.org/10.3390/f13010082>.

408. Waseem S., Khayyam U. Loss of vegetative cover and increased land surface temperature: A case study of Islamabad, Pakistan // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 234. pp. 972–983. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.228>.

409. Weyant, J., Azar, C., Kainuma, M., Jiang, K., Nakicenovic, N., Shukla, P.R., La Rovere, E. and Yohe, G. (2009), Report of 2.6 Versus 2.9 Watts/m² RCPP Evaluation Panel, IPCC Secretariat, Geneva.

410. Weyant, J., Azar, C., Kainuma, M., Jiang, K., Nakicenovic, N., Shukla, P.R., La Rovere, E. and Yohe, G. (2009), Report of 2.6 Versus 2.9 Watts/m² RCPP Evaluation Panel, IPCC Secretariat, Geneva.
411. Wilcox K. Chile's native forests. A conservation legacy. Ancient Forest International (AFI), NW Wild Books, Redway, CA, USA, 1996. 148 p.
412. Wu Z., Lei S., Bian Z., Huang J., Zhang Y. Study of the desertification index based on the albedo-MSAVI feature space for semi-arid steppe region // *Environmental Earth Sciences*. 2019. Vol. 78. Article number: 232. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8111-9>.
413. Yang J., Wan Z., Borjigin S., Zhang D., Yan Y., Chen Y., Gu R., Gao Q. Changing Trends of NDVI and Their Responses to Climatic Variation in Different Types of Grassland in Inner Mongolia from 1982 to 2011 // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Article number: 3256. <https://doi.org/10.3390/su11123256>.
414. Yurova A.Y., Volodin E.M. Coupled simulation of climate and vegetation dynamics // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. Vol. 47. pp. 531–539. <https://doi.org/10.1134/S0001433811050124>.
415. Zhou G., Lucas-Borja M.E., Eisenhauer N., Eldridge D.J., Liu S., Delgado-Baquerizo M. Understorey biodiversity supports multiple ecosystem services in mature Mediterranean forests // *Soil Biology and Biochemistry*. 2022. Vol. 172. Article number: 108774. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108774>.
416. Zhou Z., Ding Y., Shi H., Cai H., Fu Q., Liu S., Li T. Analysis and prediction of vegetation dynamic changes in China: Past, present and future // *Ecological Indicators*. 2020. Vol. 117. pp. 106642. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106642>.